

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robotiky

Bezpilotní monitorovací robot pro identifikaci znečištění ovzduší

Unmanned Monitoring Robot for Identification of an Air Pollution

Student:

Jaroslav Palička

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Matěj Gala

Ostrava 2015

Zadání bakalářské práce

Student: **Jaroslav Palička**

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 2301R013 Robotika

Téma: **Bezpilotní monitorovací robot pro identifikaci znečištění ovzduší**
Unmanned Monitoring Robot for Identification of an Air Pollution

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te rešerši v oblasti použitelných létajících bezpilotních strojů pro monitoring ovzduší s možností detekce nebezpečných či zdraví škodlivých plynů. Analyzujte Vyhlášku č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší, konkrétně pro výkonnovou kategorii spalovacích stacionárních zdrojů používaných u rodinných domů. Proved'te rozbor vhodných senzorů pro detekci plynů a kamer.
2. Na základě požadavkového listu navrhnete nejméně 3 konstrukční varianty bezpilotního monitorovacího robotu a vhodnou analýzou na základě zvolených kritérií vyberte nejoptimálnější variantu.
3. Zvolenou variantu rozpracujte do úrovně podrobného 3D modelu s využitím dostupného CAD systému. Výkresovou dokumentaci zpracujte dle rozsahu určeném vedoucím práce. Navržené řešení podložte vhodnými návrhovými a kontrolními výpočty.
4. Práci odevzdejte v elektronické podobě i ve formátu MS WORD.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha:Český normalizační institut, srpen 2007. 48 s.

ČSN ISO 690 *Informace a dokumentace - Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů*. Praha:Český normalizační institut, 2010.

KÁRNÍK, L. *Servisní roboty*. 1. vydání. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004, 139 s. ISBN 80-248-0626-6.

GLOGER, M. *Senzorika servisních robotů*. 1. vydání. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012. 63 s.

Vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. *Ministerstvo životního prostředí České republiky* [online]. 2012 [cit. 2014-11-13]. Dostupné z: <http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/d79c09c54250df0dc1256e8900296e32/ae682a6b5e42e986c1257ba60025d8b5?OpenDocument>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Matěj Gala**

Datum zadání: 31.10.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015

prof. Dr. Ing. Petr Novák
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 15. 5. 2015

.....

Prohlašuji, že

- jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu
- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3)
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce, souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé bakalářské práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše)
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách) ve znění pozdějších předpisů bez ohledu na výsledek její obhajoby

V Ostravě dne 15. 5. 2015

.....

Jaroslav Palička

Ztracená 219/12

724 00, Ostrava - Proskovice

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Matěji Galovi za ochotu, užitečné rady a cenné připomínky při odborném vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Pavle Paličkové za jazykovou korekturu práce. Dík patří také celé mé rodině za všestrannou podporu při studiu.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PALIČKA, Jaroslav. *Bezpilotní monitorovací robot pro identifikaci znečištění ovzduší*. Ostrava, 2015. x s. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robotiky.

Vedoucí práce Ing. Matěj Gala

Bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem bezpilotního prostředku, který bude schopen identifikovat lokální znečišťovatele ovzduší v malých obcích. Detekuje množství škodlivin, nalezne zdroj znečištění, určí polohu a vyfotografuje. V teoretické části práce jsou analyzovány možnosti dálkově řízených létajících zařízení, emisní limity rodinných domů, možnosti senzorového vybavení pro zjištění znečištění ovzduší, možnosti komunikace s operátorem, možné varianty řešení a výběr optimální varianty. V další části je pak zpracováno technické řešení zvoleného létajícího zařízení.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

PALIČKA, Jaroslav. *Unmanned Monitoring Robot for Identification of an Air Pollution*. Ostrava, 2015. x p. Bachelor thesis. VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of robotic.

Head of the thesis Ing. Matěj Gala

This bachelor thesis deals with design of UAV, which will be able to identify local air polluters in the villages. Detects the amount of pollutants, finds the source of contamination, determine the position and take the photo. The theoretical part of the thesis analyzed the possibilities of remote-controlled flying devices, emission limits houses, the possibility sensor equipment to detect air pollution, communication with the operator, possible solutions and choosing the optimum variant. The next part is then processed by the technical solutions chosen flying device.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	10
1 Úvod	12
2 Rešerše	13
2.1 Bezpilotní letouny	13
2.1.1 SIG Kadet Seniorita 1600mm	13
2.1.2 Tiger Trainer 60 ARF	14
2.2 Multikoptéry a helikoptéry	15
2.2.1 DJI - F450 ARF	16
2.2.2 DJI - F550 ARF	17
2.2.3 INNOVA 550 FBL	18
2.3 Vyhláška	19
2.4 Senzory	20
2.4.1 CO-Oxid uhelnatý	20
2.4.2 TOC-Celkový organický uhlík	21
2.4.3 TZL-Tuhé znečišťující látky	21
2.5 Záznam a přenos obrazu	23
2.5.1 Záznam obrazu	23
2.5.2 Přenos obrazu	24
3 Požadavkový list	25
4 Varianty řešení	26
4.1 Varianta č. 1 – Letadlo	26
4.2 Varianta č. 2 – Helikoptéra	29
4.3 Varianta č. 3 – Multikoptéra	31
4.4 Výběr vhodné varianty	33
4.5 Podrobnější popis zvolené varianty	36
5 Návrh multikoptéry	37
5.1 Dimenzování pohonů	37
5.1.1 Volba motorů	38
5.1.2 Režimy letu	40
5.1.3 Průměrná spotřeba proudu motorů	41
5.2 Kamera, přenos obrazu a ovládání	41
5.2.1 Kamera	41
5.2.2 Přenos obrazu	42
5.2.3 Ovládání	43
5.3 Senzorické vybavení	44

5.4	Řídící elektronika	46
5.4.1	Kompletní řídící jednotka	46
5.4.2	Řízení otáček	47
5.4.3	Servomotor kamery	47
5.4.4	Regulace napětí	48
5.5	Zapojení elektroniky	49
5.6	Návrh napájení	50
5.6.1	Volba akumulátoru	50
6	Konstrukce	51
6.1	Návrh ramene	52
6.2	Uchycení kamery	53
6.3	Vyvážení a rozmístění komponentů	53
6.4	Krytování	55
7	Závěr	57
	Použité zdroje	59
	Přílohy	62

Seznam použitých zkratk a symbolů

Značka	Význam	Jednotka
<i>AC</i>	střídavý proud	
<i>CO</i>	oxid uhelnatý	[mg/m ³]
<i>CREO</i>	3D CAD systém	
<i>DC</i>	stejnoseměrný proud	
<i>Full HD</i>	videorežim vysokého rozlišení	
<i>F_{VZ}</i>	vztlaková síla	[N]
<i>G</i>	gravitační tíha	[N]
<i>GPS</i>	globální polohový systém	
<i>HDMI</i>	obrazový a zvukový signál v digitálního formátu ve vysokém rozlišení	
<i>I</i>	elektrický proud	[A]
<i>I_{cm}</i>	celková spotřeba proudu motorů	[A]
<i>I_{klesání}</i>	spotřeba proudu motorů při klesání	[A]
<i>I_{spouštění}</i>	spotřeba proudu motorů při stoupání	[A]
<i>I_{visení}</i>	spotřeba proudu motorů při visení	[A]
<i>I_{vod.let}</i>	spotřeba proudu motorů při vodorovném letu	[A]
<i>LED</i>	light-emitting diode	

<i>Li-Pol</i>	lithium-polymerový akumulátor	
<i>P</i>	výkon	[W]
<i>PC</i>	osobní počítač	
<i>RC</i>	rádiové řízení	
<i>RPM</i>	otáčky	[ot/min]
<i>T</i>	tah motoru	[N]
<i>Thrust (G)</i>	tah motoru	[g]
<i>TOC</i>	celkový organický uhlík	[mg/m ³]
<i>TZL</i>	tuhé znečišťující látky	[mg/m ³]
<i>U</i>	elektrické napětí	[V]
<i>UAV</i>	bezpilotní létající stroj	
<i>f</i>	frekvence	[Hz]
<i>m</i>	hmotnost	[kg]
<i>p</i>	tlak	[kPa]

1 Úvod

Cílem této práce je konstrukce létajícího robotu, který bude schopen identifikovat lokální znečišťovatele ovzduší v malých obcích. Detekuje množství škodlivin, nalezne zdroj znečištění, určí polohu a vyfotografuje. Létající robot neboli bezpilotní letoun popřípadě UAV (Unmanned Aerial Vehicle), což je letoun bez posádky, který může být ovládán dálkově nebo létat samostatně pomocí naprogramovaných letových plánů nebo pomocí složitějších dynamických autonomních systémů. Bezpilotní letouny nacházejí často využití v armádě k průzkumným i útočným misím. Nachází ale také mnoho využití v plnění civilních úkolů, například k hašení požárů, policejnímu sledování, doručování poštovních zásilek, průzkumu terénu, fotografování se vzduchu apod.

2 Rešerše

2.1 Bezpilotní letouny

Doposud nejužívanějším bezpilotním prostředkem pro monitorování je běžný letoun s nepohyblivými nosnými plochami a motorem. Motor může být buď spalovací, nebo elektromotor. Co se týká velikosti tohoto letounu, tak odhadované rozpětí by bylo okolo dvou metrů. Konstrukčně by letoun byl řešen jako klasický RC model letadla s vyšší nosností a vnitřním prostorem pro zabudování všech potřebných senzorů, kamery, GPS a systému automatického řízení.

Hlavní výhody tohoto provedení jsou samozřejmě relativně nízká spotřeba energie při vysoké nosnosti, jednoduše proveditelné ovládání a také snadná ovladatelnost. Dále také při vysazení pohonné jednotky je stále možno doklouzat a někam relativně bezpečně přistát.

Mezi nevýhody patří například velké rozměry, náročnost na aerodynamické výpočty. Dále příliš vysoká minimální rychlost, při níž by nebylo možné pomocí senzorů zachytit lokální znečištění například nad rodinným domem a ani identifikovat daného znečišťovatele. Také by při takové rychlosti zřejmě nebyl možný odběr vzorků z dané lokality. Dalším problémem by mohlo být použití spalovacího motoru, který by při umístění v přidi letadla ovlivňoval svými spaliny senzory. Tento problém by však byl jednoduše řešitelný změnou koncepce, kdy by byl motor použit jako tlačný.

2.1.1 SIG Kadet Seniorita 1600mm

Cvičný model hornoplošníku pro dvoutaktní spalovací motor, nebo elektromotor. Klasická lehká celo balsová konstrukce, ovládáno směrové kormidlo, výškové kormidlo. [11]



obr. 2.1 SIG Kadet Seniorita 1600mm [11]

Technické informace	
Rozpětí [mm]	1 600
Délka [mm]	1 270
Hmotnost [g]	1 701
Plocha křídla [dm ²]	48.13
Stavební náročnost	Snadná
Náročnost pilotáže	Snadná
Cena [kč]	2 199

tab. 2.1 Technické informace SIG Kadet Seniorita [11]

2.1.2 Tiger Trainer 60 ARF

Tiger Trainer 60 je klasické konstrukce z balsy a lehké překližky potažené nažehlovací fólií. Křídlo o rozpětí 1830 mm s velkou nosnou plochou zaručuje výborné vlastnosti v širokém rozmezí rychlostí. Trup z lehké překližky má odnímatelný plastový kryt motoru a mnoho místa uvnitř modelu pro vybavení. Tříkolový drátový podvozek s řiditelnou předovou nohou umožňuje bezpečně "operovat" z letiště s asfaltovým i travnatým povrchem. [11]



obr. 2.2 Tiger Trainer 60 [14]

Technické informace	
Rozpětí [mm]	1 830
Délka [mm]	1 500
Hmotnost [g]	2 950
Plocha křídla [dm ²]	58,2
Stavební náročnost	Snadná
Náročnost pilotáže	Snadná
Cena [Kč]	2 612

tab. 2.2 Technické informace Tiger Trainer 60 [14]

2.2 Multikoptéry a helikoptéry

V dnešní době se pro monitorování stále častěji používá takzvaná multikopéra, což je letadlo s dvěma a více rotujícími nosnými plochami. V tomto případě by se zřejmě jednalo o kvadrokoptéru se čtyřmi motory, nebo hexakoptéru s šesti motory. Záviselo by na celkové hmotnosti a tudíž požadovaném tahu na motory, které budou k dispozici. Konstrukčně by multikoptéra byla řešena zkříženými nosníky, na jejichž koncích by byly umístěné motory a uprostřed zabudované a dostatečně zakrytované všechny senzory, kamera, GPS, přijímač, ovládací prvky, a systému automatického řízení. Velikostně by tato multikoptéra mohla mít kolem jednoho metru na průměr kolem motorů.

Výhodami této varianty jsou například pomalý pohyb v prostoru popřípadě stání na místě a natáčení se podle potřeby, což je vhodné právě pro vyhledávání znečištěných lokalit, fotografování a také odběr vzorků. Při vysazení jednoho motoru je multikoptéra stále schopná bezpečně přistát. Dále také docela jednoduchá konstrukce a dostatek prostoru pro veškeré potřebné vybavení.

Nevýhodami by mohly být náročné výpočty vrtulí, relativně vysoká spotřeba energie. Také senzor pro detekci kouře by bylo potřeba umístit tak, aby nebyl ovlivňován vrtulovým proudem, což by mohl být problém.

Bylo by možné pro monitorování využít také model helikoptéry, která se vyznačuje podobnými vlastnostmi jako multikoptéra. Avšak má jen jeden hlavní rotor, tudíž vyšší nároky na konstrukci i řízení.

2.2.1 DJI - F450 ARF

Kvadroptéra pro rekreační i poloprofesionální poletování pro radost i k leteckému snímkování. Základem draku modelu jsou dvě středové kompozitové desky, které nesou řídicí elektroniku, pohonný akumulátor a případné "užitečné zatížení". Na spodní desce jsou (technikou plošných spojů) vytvořené vodivé cesty zajišťující rozvod napájení jednotlivých regulátorů a omezující tak množství kabelů na palubě - představuje to také významnou úsporu hmotnosti. Motory jsou nesené na příhradových ramenech vyliisovaných z pevného plastu plněného skelnými vlákny se zalisovanými mosaznými pouzdry pro šrouby. [13]



obr. 2.3 DJI - F450 ARF [13]

Technické informace	
Délka [mm]	450
Průměr nosného rotoru [mm]	254
Hmotnost (prázdná) [g]	282
Hmotnost letová [g]	800 - 1600
Stavební náročnost	Snadná
Náročnost pilotáže	Snadná
Cena [Kč]	5 190

tab. 2.3 Technické informace DJI - F450 ARF [13]

2.2.2 DJI - F550 ARF

Hexakoptéra pro rekreační i poloprofesionální poletování pro radost i k leteckému snímkování. Základem draku modelu jsou dvě středové kompozitové desky, které nesou řídící elektroniku, pohonný akumulátor a případné "užitečné zatížení". Na spodní desce jsou (technikou plošných spojů) vytvořené vodivé cesty zajišťující rozvod napájení jednotlivých regulátorů a omezující tak množství kabelů na palubě - představuje to také významnou úsporu hmotnosti. Motory jsou nesené na příhradových ramenech vyliisovaných z pevného plastu plněného skelnými vlákny se zalisovanými mosaznými pouzdry pro šrouby. [15]



obr. 2.4 DJI - F550 ARF [15]

Technické informace	
Délka [mm]	550
Průměr nosného rotoru [mm]	254
Hmotnost (prázdná) [g]	478
Hmotnost letová [g]	1200 - 2400
Stavební náročnost	Snadná
Náročnost pilotáže	Snadná
Cena [Kč]	8 290

tab. 2.4 Technické informace DJI - F550 ARF [15]

2.2.3 INNOVA 550 FBL

Precizně propracovaný model vrtulníku Innova 550 FBL od firmy KDS s bezpádlovou kovovou mechanikou určený pro pokročilé piloty. Speciální konstrukce rotorové hlavy umožňující větší rychlost a pružnost letu při 3D akrobacii je vyrobena z tvrdé duralové slitiny, uložení v kuličkových ložiskách, pohon ocasního rotoru řemenem. Hlavní rám je vyroben z uhlíkového laminátu vyztužený duralovými díly a poskytuje modelu vysokou tuhost, která je potřebná pro 3D létání. [12]



obr. 2.5 Innova 550 FBL [12]

Technické informace	
Průměr hlavního rotoru [mm]	1250
Délka [mm]	1120
Hmotnost [g]	1 650
Délka rotorového listu	550
Stavební náročnost	Střední
Náročnost pilotáže	Vysoká
Cena [Kč]	9 499

tab. 2.5 Technické informace Innova 550 FBL [12]

2.3 Vyhláška

V České Republice je v platnosti zákon o ochraně ovzduší, který má za úkol předcházet znečišťování ovzduší a určuje limity emisí, které mohou lidé vypouštět ze svých komínů.

„Předpis č. 201/2012 Sb.

Zákon o ochraně ovzduší

Příloha č. 11 k zákonu č. 201/2012 Sb.

Minimální emisní požadavky na spalovací stacionární zdroj na pevná paliva o jmenovitém tepelném příkonu od 10 do 300 kW včetně, který slouží jako zdroj tepla pro teplovodní soustavu ústředního vytápění

Dodávka Paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný příkon (kW)	Mezní hodnoty emisí ¹⁾		
			CO	TOC ^{2), 3)}	TZL
			mg.m ⁻³		
Ruční	Biologické	≤ 65	5000	150	150
		> 65 až 187	2500	100	150
		> 187 až 300	1200	100	150
	Fosilní	≤ 65	5000	150	125
		> 65 až 187	2500	100	125
		> 187 až 300	1200	100	125
Samočinná	Biologické	≤ 65	3000	100	150
		> 65 až 187	2500	80	150
		> 187 až 300	1200	80	150
	Fosilní	≤ 65	3000	100	125
		> 65 až 187	2500	80	125
		> 187 až 300	1200	80	125

tab. 2.6 Emisní požadavky [4]

1) Vztahuje se k suchým spalinám, teplotě 273,15 K, tlaku 101,325 kPa a k referenčnímu obsahu kyslíku 10 %; pro sálavé spalovací stacionární zdroje, určené pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění a k instalaci v obytné místnosti, se hodnoty vztahují k referenčnímu obsahu kyslíku 13 %.

2) TOC = celkový organický uhlík, kterým se rozumí úhrnná koncentrace všech organických látek s výjimkou methanu vyjádřená jako celkový uhlík.

3) Nevztahuje se na sálavé spalovací stacionární zdroje, určené pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění a k instalaci v obytné místnosti.“ [4]

2.4 Senzory

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že bude potřeba senzorů pro detekci mezního množství CO, TOC a TZL ve vzduchu. Avšak pro dané užití jsou k dispozici pouze senzory pro detekci koncentrace CO.

2.4.1 CO-Oxid uhelnatý

„Oxid uhelnatý (starší terminologií kysličník uhelnatý) je bezbarvý plyn bez chuti a zápachu, nedráždivý. Je lehčí než vzduch, ale se vzduchem se mísí. Ve vodě je málo rozpustný. Je obsažen ve svítiplynu, v generátorovém a ve vodním plynu; má silně redukční vlastnosti. V přírodě je přítomen v nepatrném množství v atmosféře, kde vzniká především fotolýzou oxidu uhličitého působením ultrafialového záření, jako produkt nedokonalého spalování fosilních paliv i biomasy.“ [5]

Detekce Plynu CO Oxid Uhelnatý Arduino Modul

Výstupní signál: Analogový výstup a TTL

Modul pro detekci oxidu uhelnatého

Rychlá reakce a dlouhá životnost

LED indikace

Pracovní napětí: 5V DC

Výstupní napětí: 0-5V / Čím vyšší koncentrace, tím vyšší výstupní napětí

Rozměry desky: 35mm x 22mm



obr. 2.6 MQ-7 Detekce Plynu CO Oxid Uhelnatý Arduino Modul [8]

Plynové čidlo oxidu uhelnatého Figaro TGS 2442-B00, oxid uhelnatý

Nový TGS 2442 je senzor oxidu uhelnatého s aktivním uhlím založený na technologii tlustých vrstev. Tento velmi citlivý senzor se vyznačuje malou konstrukční velikostí a nízkým ztrátovým výkonem. [16]



obr. 2.7 Plynové čidlo oxidu uhelnatého Figaro TGS 2442-B00, oxid uhelnatý [16]

2.4.2 TOC-Celkový organický uhlík

„TOC je zkrácené označení pro celkový organický uhlík (TOC – Total Organic Carbon), který je uveden mezi sledovanými skupinami látek v IRZ (pod číslem 76 dle přílohy II Nařízení č. 166/2006/ES). TOC je parametr uváděný u vod, který ukazuje množství organických látek přítomných v daném vzorku. Do skupiny TOC je možné zařadit obrovskou škálu látek. Tento parametr je udáván v miligramech uhlíku na jeden litr vody. Stanovení TOC nejlépe vystihuje sumární koncentraci organických látek.“ [6]

2.4.3 TZL-Tuhé znečišťující látky

„Jsou to částice od 0,1 μ m po 0,5 mm charakteristické různorodým složením. Tuhé znečišťující látky mohou vznikat jak přírodní tak lidskou činností. Spalování paliv patří k méně významným činnostem, při kterých prach vzniká.

Z hlediska lidského zdraví jsou nejnebezpečnější částice v rozmezí 0,25 až 5 μ m, přičemž nejvíce jsou v plicích zadržovány částice o velikosti kolem 1 μ m. Plice mají schopnost samočištění, řada škodlivin, které se dostávají do plic spolu s tuhými částicemi (kyselé aerosoly, těžké kovy a perzistentní organické látky), však tuto schopnost plic trvale narušuje a mají další škodlivé vlivy na zdraví člověka.“ [7]

Plynové čidlo kvality ovzduší Figaro TGS 2600-B00, znečištění vzduchu

TGS 2600, specifikovaný pro monitorování celkové kvality ovzduší, vysoce selektivně reaguje na různá znečištění, která se vyskytují např. v cigaretovém kouři. Snímací prvek MOS založený na technologii silných vrstev má ztrátový výkon pouhých cca 15 mW na snímací prvek a typ. 210 mW na žhavicí drát. [10]



obr. 2.8 Plynové čidlo kvality ovzduší Figaro TGS 2600-B00, znečištění vzduchu [10]

2.5 Záznam a přenos obrazu

Průmyslových kamer vhodných pro tohoto robota je na trhu k sehnání spousta, od různých výrobců, různých tvarů a rozměrů, s pestrým výběrem všech potřebných parametrů. Je potřeba, aby kamera byla digitální s možností propojení s dalšími přístroji a s možností záznamu na vlastní integrovanou paměť. Dále jsme limitováni rozměry a co nejnížší hmotností. Také by bylo vhodné, aby kamera byla odolná vůči otřesům a měla co nejvyšší kvalitu obrazu.

2.5.1 Záznam obrazu

GoPro HD HERO 3

Známa a oblíbená digitální kamera GoPro s možností záznamu obrazu na vlastní paměť a také online přenosu obrazu ve Full HD. [23]



obr. 2.9 GoPro HD HERO 3 [23]

CMOS Camera for FPV

Průmyslová digitální kamera s rozlišením 720 x 480 pixel pro roboty. [22]



obr. 2.10 CMOS Camera [22]

2.5.2 Přenos obrazu

Souprava pro přenos obrazu v aktuálním čase, ve vysoké kvalitě a na velké vzdálenosti
DJI Lightbridge. [21]



obr. 2.11 Přenos obrazu pomocí DJI Lightbridge [21]

3 Požadavkový list

Obecné požadavky

- Odolnost vůči venkovním povětrnostním vlivům
- Schopnost zastavení ve vzduchu a tzv. visení
- Hmotnost do 3 kg
- Největší rozměr do 1,5 m
- Výdrž alespoň 30 min
- Dosah alespoň 1 km
- Jednoduchá konstrukce
- Nízké pořizovací náklady

Požadavky na senzory a elektroniku

- Detekce kouře
- Detekce nadlimitního CO
- Detekce pevných částic a odběr jejich vzorku
- Lokace pomocí GPS
- Záznam a přenos obrazu

Další požadavky

- Reflexní zbarvení
- Minimalizovat vibrace a zamezit jejich přenosu do elektroniky
- Ovládání ze stanoviště operátora
- Snadná pilotáž
- Jednoduchá předletová příprava
- Vzlet a přistání na malém prostoru
- Snadná údržba

4 Varianty řešení

4.1 Varianta č. 1 – Letadlo

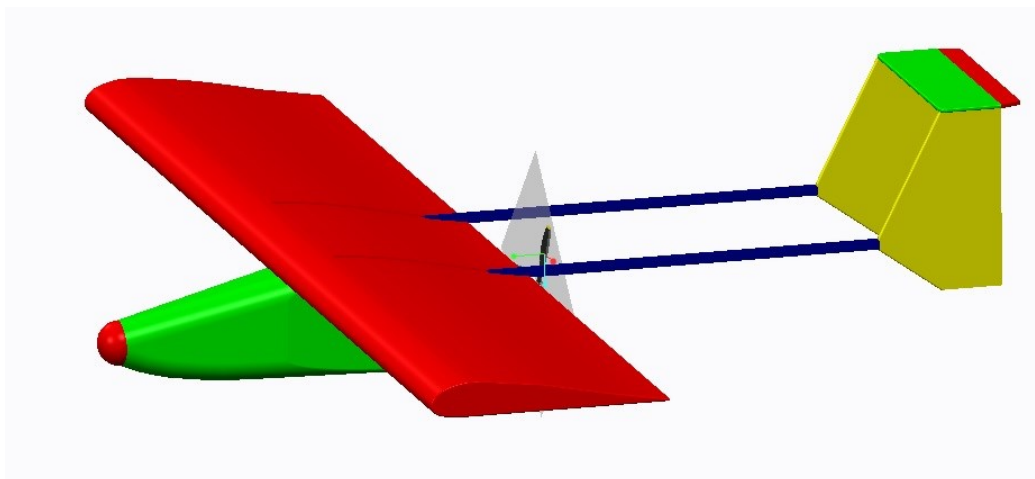
První variantou řešení monitorovacího letounu je model založený na podobné konstrukční koncepci, jako například letoun Sojka, což je bezpilotní monitorovací letoun armády ČR. Tudíž je model hornoplošník, což zlepší letovou stabilitu. Vzhledem k nepříznivým vlivům turbulentního vrtulového víru a výfukových spalín na snímače je užito uspořádání s tlačným motorem. Trup je v tomto případě řešen dvěma nosníky vedoucími z křídla od hlavního nosníku. Oba nosníky jsou zakončeny svým směrovým kormidlem, které jsou dále ve své horní části spojeny výškovým kormidlem. Křídlo je v půdorysu obdélníkového tvaru s jednoduchým profilem stejným po celé délce. Není nijak krouceno a je přímé bez vzepětí. Rozpětí křídla je 1,4 m. Střední část křídla, kde je připevněn trup a trupové nosníky je zpevněná. Trup je vyroben převážně z překližky a balsy. Vnitřek trupu je dělen přepážkami, které slouží k umístění jednotlivých komponent a k dělení vnitřního prostoru. V zadní části trupu je umístěna motorová přepážka s motorem, palivová nádrž a uchycení křídla. Ve střední části je baterie a základní elektronika potřebná pro řízení a GPS. V přídí modelu je umístěna kamera a potřebné snímače. Hmotnost tohoto modelu by byla přibližně 1,5 kg v prázdném stavu bez elektroniky. A vzletová hmotnost by byla dána výkonem motoru, odhadem okolo 3 kg. Rychlost modelu bychom zjistili z rychlostní poláry, přibližná minimální rychlost bude 10 m/s a maximální 20 m/s.

Výhody:

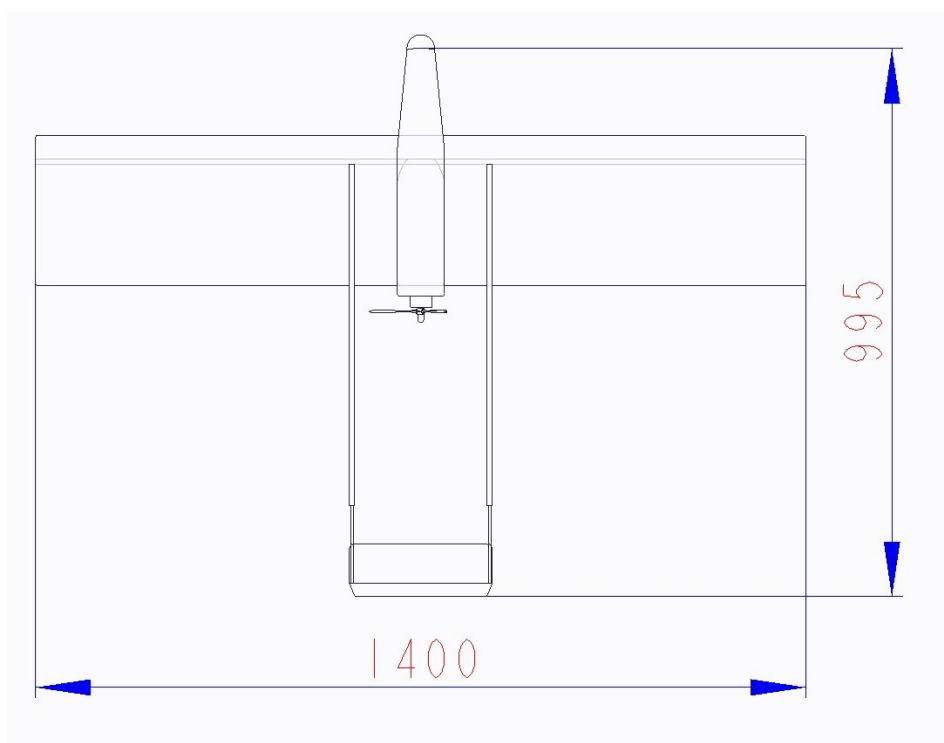
- Nízká spotřeba energie
- Vysoká maximální rychlost
- Jednoduchost konstrukce

Nevýhody:

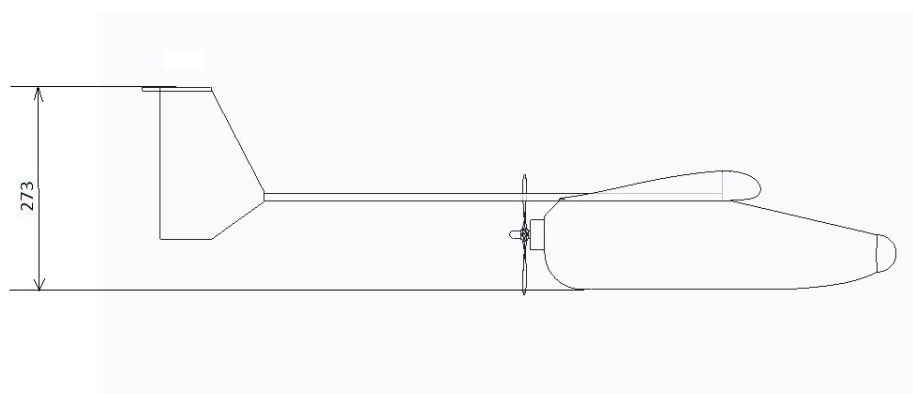
- Vysoká minimální rychlost
- Bez možnosti zastavení ve vzduchu



obr. 4.1 Letoun vymodelovaný v CREO 2.0



obr. 4.2 Vnější rozměry - půdorys



obr. 4.3 Vnější rozměry - bokorys

Technické parametry (orientační)	
Rozpětí [mm]	1400
Délka [mm]	995
Výška [mm]	273
Hmotnost prázdná/vzletová [kg]	1,5/3
Náročnost pilotáže	snadná
Náročnost při plnění daného úkolu-monitoring ovzduší	vysoká
Náročnost konstrukce	střední
Energetická náročnost	nízká
Motor	1x spalovací 4ccm 0,65kW
Akumulátor	Li-Pol 2200mAh
Náklady * [kč]	8 000

tab. 4.1 Technické parametry varianty č. 1 – Letadlo

* Odhad nákladů na potřebný materiál a komponenty k sestavení letuschopného stroje (nezahrnuje senzory, kameru, RC vysílačku a speciální komponenty pro plnění daného úkolu)

4.2 Varianta č. 2 – Helikoptéra

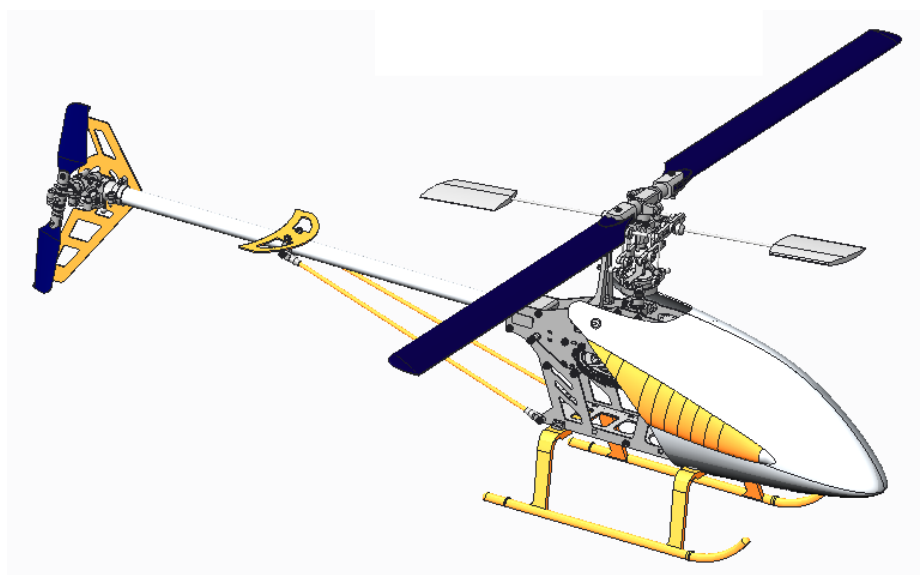
Druhou variantou řešení monitorovacího letounu je RC model vrtulníku o dostatečné nosnosti. Toto řešení se oproti ostatním vyznačuje mnoha problémy. Kvůli užití jedné pohonné jednotky je potřeba její vysoký výkon a tudíž má také tomu odpovídající odběr energie, čímž se zvedá hmotnost. Také pokud tato jediná pohonná jednotka vypoví funkci za letu, bude následovat okamžitý neřízený pád. Dále vnitřní úložný prostor je vzhledem k velikosti celého modelu docela malý. Další podstatný problém je složitost řešení hlavního rotoru a také vedení točivého momentu k zadnímu rotoru. Na druhou stranu je tato varianta vhodná především díky možnosti zastavení ve vzduchu a stání (tzv. visení).

Výhody:

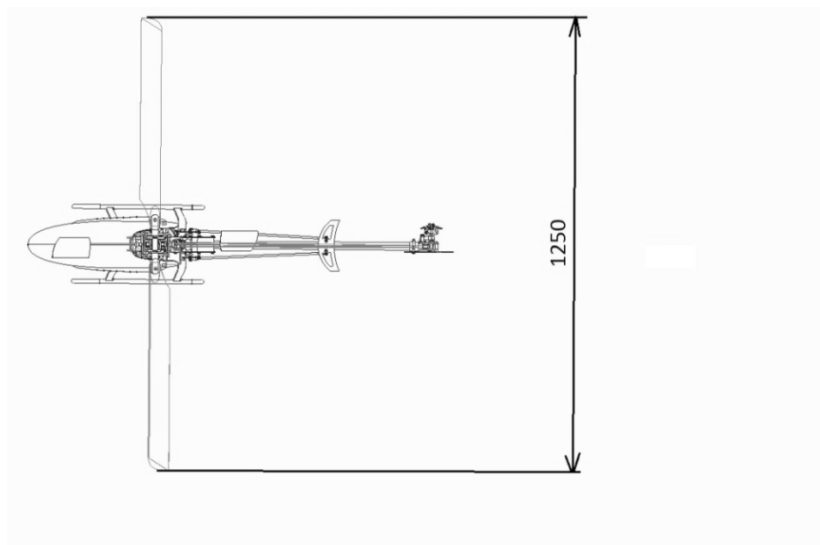
- Možnost tzv. visení

Nevýhody:

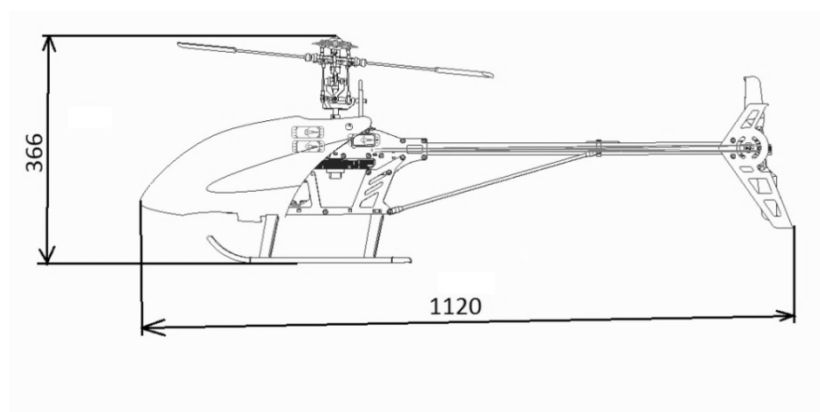
- Složitost konstrukce
- Při vysazení motoru okamžitý pád
- Vysoká spotřeba energie



obr. 4.4 Helikoptéra v CREO 2.0



obr. 4.5 Vnější rozměry – půdorys



obr. 4.6 Vnější rozměry – bokorys

Technické parametry (orientační)	
Průměr hlavního rotoru [mm]	1250
Délka [mm]	1120
Výška [mm]	366
Hmotnost prázdná/vzletová [kg]	1,6/2,6
Náročnost pilotáže	střední
Náročnost při plnění daného úkolu-monitoring ovzduší	střední
Náročnost konstrukce	vysoká
Energetická náročnost	vysoká
Motor	ele. 2,5kW
Akumulátor	Li-Pol 22.2V / 4500mAh
Náklady * [kč]	18 000

tab. 4.2 Technické parametry varianty č. 2 – Helikoptéra

* Odhad nákladů na potřebný materiál a komponenty k sestavení letuschopného stroje (nezahrnuje senzory, kameru, RC vysílačku a speciální komponenty pro plnění daného úkolu)

4.3 Varianta č. 3 – Multikoptéra

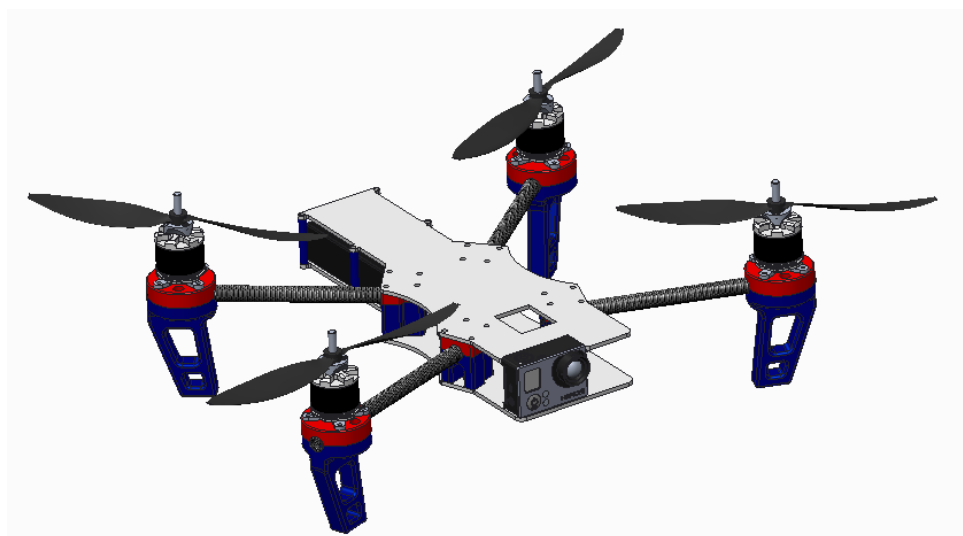
Třetí variantou řešení monitorovacího letounu je v dnešní době velmi oblíbená multikoptéra. Což je technicky dost zajímavý stroj skládající se z těla, kde je zabudovaná většina elektroniky, z těla vychází daný počet ramen, na jejichž koncích jsou motory s vrtulemi. Vzhledem k danému úkolu, který by měl monitorovací letoun plnit, by měla být tato multikoptéra vyhovující. Její konstrukce je poměrně jednoduchá a většina složitějších komponentů, jako například motory, jsou snadno sehnatelné. Také díky malým plochám nebude model příliš náchylný na poryvy větru. Další velkou výhodou je možnost zastavení ve vzduchu a stání (tzv. visení). Asi snad jedinou podstatnou nevýhodou je vyšší spotřeba energie.

Výhody:

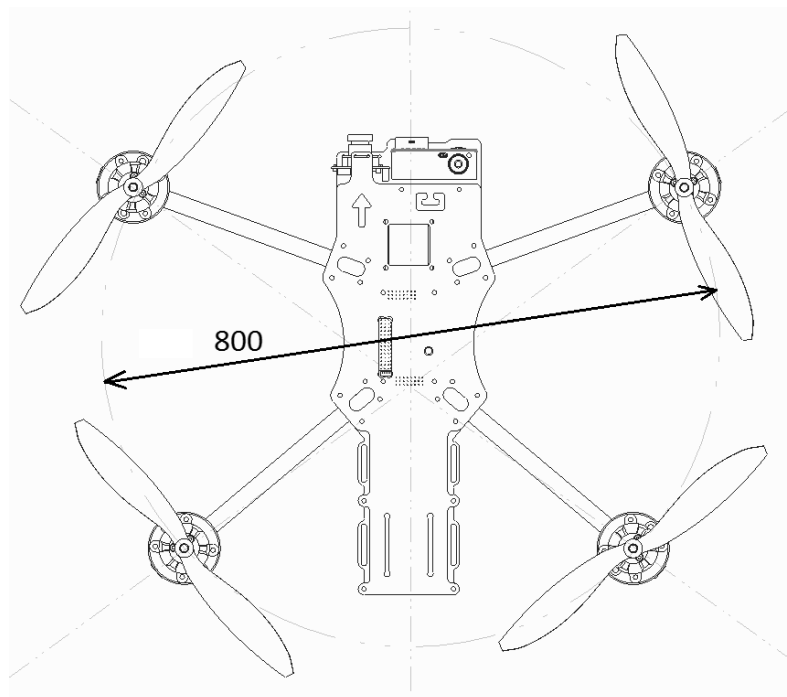
- Jednoduchá konstrukce
- Snadná ovladatelnost
- Možnost tzv. visení

Nevýhody:

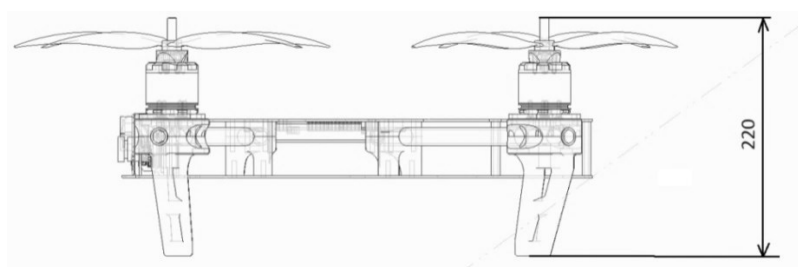
- Vyšší spotřeba energie



obr. 4.7 Multikoptéra v CREO 2.0



obr. 4.8 Vnější rozměry - půdorys



obr. 4.9 Vnější rozměry – bokorys

Technické parametry (orientační)	
Průměr roztečné kružnice rotorů [mm]	800
Výška [mm]	220
Hmotnost prázdná/vzletová [kg]	0,9/1,8
Náročnost pilotáže	střední
Náročnost při plnění daného úkolu-monitoring ovzduší	nízká
Náročnost konstrukce	střední
Energetická náročnost	střední
Motory	4x E600 200W
Akumulátor	Li-Pol 14,8 V 3300 mAh
Náklady * [kč]	10 000

tab. 4.3 Technické parametry varianty č. 3 – Multikoptéra

* Odhad nákladů na potřebný materiál a komponenty k sestavení letuschopného stroje (nezahrnuje senzory, kameru, RC vysílačku a speciální komponenty pro plnění daného úkolu)

4.4 Výběr vhodné varianty

Volba kritérií		
Označení kritéria	Kritérium	Charakteristika kritéria
K1	Visení	Možnost zastavení ve vzduchu
K2	Hmotnost	Hmotnost prázdného stroje
K3	El. spotřeba	Energetická náročnost
K4	Náklady	Náklady na potřebný materiál a komponenty k sestavení letuschopného stroje
K5	Rozměry	Velikost největšího rozměru
K6	Konstrukce	Náročnost na výpočty, materiály, technologie a stavbu stroje
K7	Plnění úkolu	Obtížnost nalezení znečišťovatele a provedení měření
K8	Pilotáž	Náročnost ovládání z operátorského stanoviště

tab. 4.4 Volba kritérií

Hodnocení kritérií

Kritérium	Varianta č. 1	Varianta č. 2	Varianta č. 3
K1 - Visení	Ne	Ano	Ano
K2 - Hmotnost	1,5	1,6	0,9
K3 - El. spotřeba	Nízká	Vysoká	Střední
K4 - Náklady	8 000	18 000	10 000
K5 - Rozměry	1 400	1 250	800
K6 - Konstrukce	Střední	Vysoká	Střední
K7 - Plnění úkolu	Vysoká	Střední	Nízká
K8 - Pilotáž	Nízká	Střední	Střední

tab. 4.5 Hodnocení kritérií

Hodnocení 1 – 5 (optimální → 5; nevyhovující → 1)

Kritérium	Varianta č. 1	Varianta č. 2	Varianta č. 3
K1 - Visení	1	5	5
K2 - Hmotnost	3	2	4
K3 - El. spotřeba	5	1	3
K4 - Náklady	5	1	4
K5 - Rozměry	2	3	5
K6 - Konstrukce	3	1	3
K7 - Plnění úkolu	1	4	5
K8 - Pilotáž	4	3	3

tab. 4.6 Číselné hodnocení kritérií

Určení významnosti kritérií

Porovnávané páry kritérií							Počet voleb v	Pořadí	Váha významnosti q
K1	K1	K1	K1	K1	K1	K1	6	1	2
K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8			
	K2	K2	K2	K2	K2	K2	3,5	5	1,58
	K3	K4	K5	K6	K7	K8			
	K3	K3	K3	K3	K3	K3	5,5	2	1,92
		K4	K5	K6	K7	K8			
	K4	K4	K4	K4	K4	K4	5	3	1,83
		K5	K6	K7	K8				
	K5	K5	K5	K5	K5	K5	1	7	1,16
		K6	K7	K8					
	K6	K6	K6	K6	K6	K6	4	4	1,66
		K7	K8						
	K7	K7					2,5	6	1,42
		K8					0,5	8	1,08

tab. 4.7 Významnost kritérií

Zhodnocení první varianty

Kritérium	Varianta č. 1			
	Hodnota	Váha významnosti q	Index změny	Vážený index kritéria
K1	1	2	1	2
K2	3	1,58	3	4,74
K3	5	1,92	5	9,6
K4	5	1,83	5	9,15
K5	2	1,16	2	2,32
K6	3	1,66	3	4,98
K7	1	1,42	1	1,42
K8	4	1,08	4	4,32
Celkový součet vážených indexů				38,53

tab. 4.8 Hodnocení první varianty

Zhodnocení druhé varianty

Kritérium	Varianta č. 2			
	Hodnota	Váha významnosti q	Index změny	Vážený index kritéria
K1	5	2	5	10
K2	2	1,58	2	3,16
K3	1	1,92	1	1,92
K4	1	1,83	1	1,83
K5	3	1,16	3	3,48
K6	1	1,66	1	1,66
K7	4	1,42	4	5,68
K8	3	1,08	3	3,24
Celkový součet vážených indexů				30,97

tab. 4.9 Hodnocení druhé varianty

Zhodnocení třetí varianty

Kritérium	Varianta č. 3			
	Hodnota	Váha významnosti q	Index změny	Vážený index kritéria
K1	5	2	5	10
K2	4	1,58	4	6,32
K3	3	1,92	3	5,76
K4	4	1,83	4	7,32
K5	5	1,16	5	5,8
K6	3	1,66	3	4,98
K7	5	1,42	5	7,1
K8	3	1,08	3	3,24
Celkový součet vážených indexů				50,52

tab. 4.10 Hodnocení třetí varianty

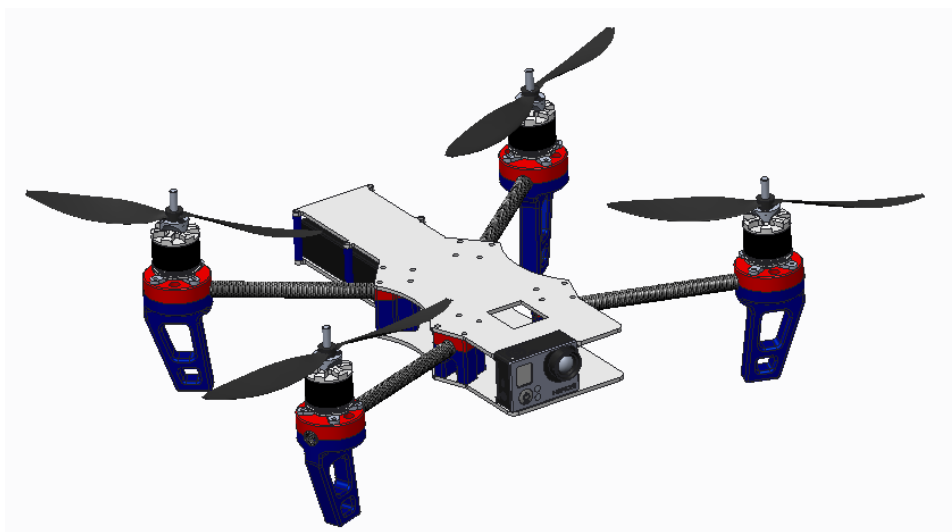
Určení výsledné optimální varianty		
Pořadí	Celkový součet vážených indexů	Varianta
2	38,53	Varianta č. 1
3	30,97	Varianta č. 2
1	50,52	Varianta č. 3

tab. 4.11 Výsledná optimální varianta

Pomocí hodnotové analýzy jsem zvolil za optimální řešení variantu č. 3, což je multikoptéra. Tuto variantu si také volím pro řešení bakalářské práce.

4.5 Podrobnější popis zvolené varianty

Moje konstrukce multikoptéry bude řešena jako kvadrokoptéra, tzn. se čtyřmi rotory. Motory budou usazeny v sedlech motorů, ke kterým budou přišroubovány nohy, každá noha a sedlo motoru bude mezi sebou svírat rameno, na kterém bude tímto připevněno. Ramena budou dále uchycena v úchytech ramen, které budou vešroubovány mezi horní a dolní plát, což bude tvořit tělo multikoptéry.



obr. 4.10 Konstrukční návrh multikoptéry

5 Návrh multikoptéry

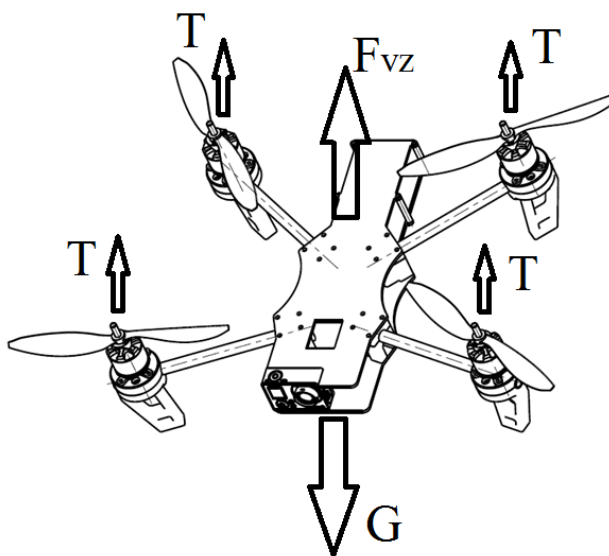
Pro konstrukční návrh multikoptéry bylo potřeba začít dimenzováním pohonů pro orientačně určenou předpokládanou hmotnost. Dále zvolit všechny potřebné komponenty a elektroniku, kterou multikoptéra bude muset nést. Navrhnout vhodný akumulátor. A všechny tyto komponenty rozmístit tak, aby byla multikoptéra vyvážená a všechny motory byly zatěžovány rovnoměrně.

5.1 Dimenzování pohonů

Pro pohon multikoptér jsou dnes běžně k sehnání kvalitní motory v sestavě již s vrtulemi s danými hodnotami tahu při volitelných otáčkách.

Počet motorů: 4

Předpokládaná hmotnost stroje: 2 kg



obr. 5.1 Určení vztlaku

Celková tíha stroje

$$G = m \cdot g = 2 \cdot 9,81 = 19,62 \text{ N} \quad (1)$$

Potřebný minimální celkový vztlak pro udržení výšky

$$F_{vz} = G = 19,62 \text{ N} \quad (2)$$

Potřebný minimální tah jednoho motoru pro udržení výšky

$$T = \frac{F_{vz}}{4} = \frac{19,62}{4} = 4,9 \text{ N} \quad (3)$$

Pro zajištění pohyblivosti, obratnosti, dobré ovladatelnosti a stability ve vzduchu je potřeba minimální vztlak navýšit alespoň o 30%

Optimální celkový vztlak

$$F_{vz.opt} = F_{vz} \cdot 1,3 = 25,5 \text{ N} \quad (4)$$

Optimální tah jednoho motoru $T = 6,4 \text{ N}$

$$T_{opt} = \frac{F_{vz.opt}}{4} = \frac{25,5}{4} = 6,4 \text{ N} \quad (5)$$

5.1.1 Volba motorů

Jako pohonná jednotka byla zvolena čtveřice motorů TMotor UAV Brushless Motor MT2212 1100Kv [21], napájení 11.1 V, vrtule T-Motor 11*3.7CF

Hmotnost jednoho motoru s vrtulí a montážními prvky je 55 g. Rozměry ϕ 27.5 x 28mm.

Dva motory budou opatřeny pravotočivou vrtulí a dva levotočivou vrtulí. Při montáži na ramena nutno pamatovat na rovnoměrné rozložení pravotočivých a levotočivých vrtulí, tak aby na roztečné kružnici nebyly za sebou v pořadí stejné vrtule.



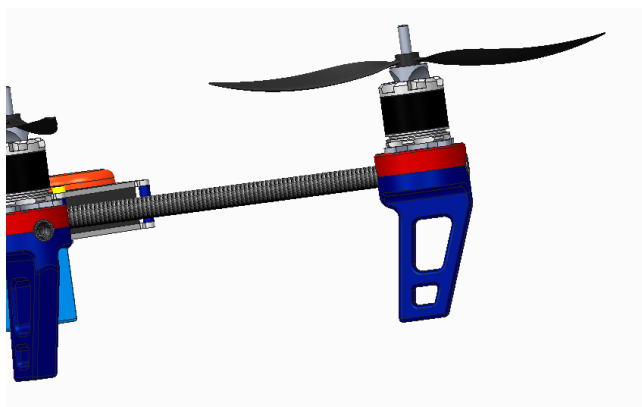
obr. 5.2 Motor MT2212 [17]

Item No.	Volts (V)	Prop	Throttle	Amps (A)	Watts (W)	Thrust (G)	RPM	Efficiency (G/W)	Operating temperature(°C)
MT2212 KV1100	11.1	T-MOTOR 8*2.7CF	50%	2.8	31	240	7550	7.74	41
			65%	3.6	40	285	8000	7.13	
			75%	4	43	300	8500	6.98	
			85%	5.2	58	370	9500	6.38	
			100%	6.2	67	420	10000	6.27	
		T-MOTOR 9*3CF	50%	3.5	39	290	6800	7.44	43
			65%	4.6	50	350	7400	7.00	
			75%	5.8	63	410	8000	6.51	
			85%	7.8	85	530	8600	6.24	
			100%	9.2	99	600	9100	6.06	
		T-MOTOR 10*3.3CF	50%	4	45	360	5700	8.00	44
			65%	5.9	65	480	6400	7.38	
			75%	7.7	82	580	7100	7.07	
			85%	10	108	700	7700	6.48	
			100%	11.9	127	780	8300	6.14	
		T-MOTOR 11*3.7CF	50%	4.3	48	420	5300	8.75	45
			65%	6.9	75	580	6200	7.73	
			75%	8.9	97	690	6800	7.11	
			85%	11.5	124	820	7400	6.61	
			100%	13.7	145	940	7800	6.48	
	14.8	T-MOTOR 8*2.7CF	50%	4	59	340	9400	5.76	43
			65%	5.3	79	420	10200	5.32	
			75%	6.2	91	470	11000	5.16	
			85%	8.1	119	590	11800	4.96	
			100%	9.9	144	700	12600	4.86	
		T-MOTOR 9*3CF	50%	5.1	75	450	8200	6.00	47
			65%	6.9	100	560	9000	5.60	
			75%	131	130	670	9800	5.15	
			85%	11.9	172	810	10500	4.71	
			100%	14.3	202	940	11300	4.65	

Notes: The test condition of temperature is motor surface temperature in 100% throttle while the motor run 10 min.

obr. 5.3 Tabulka pro dimenzování motorů [17]

Tento motor s danou vrtulí má regulovatelný tah 420 – 940 g což odpovídá 4,12 – 9,22 N což splňuje požadavky. Na obrázku 5.4 jde vidět umístění motoru na rameni multikoptéry.



obr. 5.4 Rameno s motorem

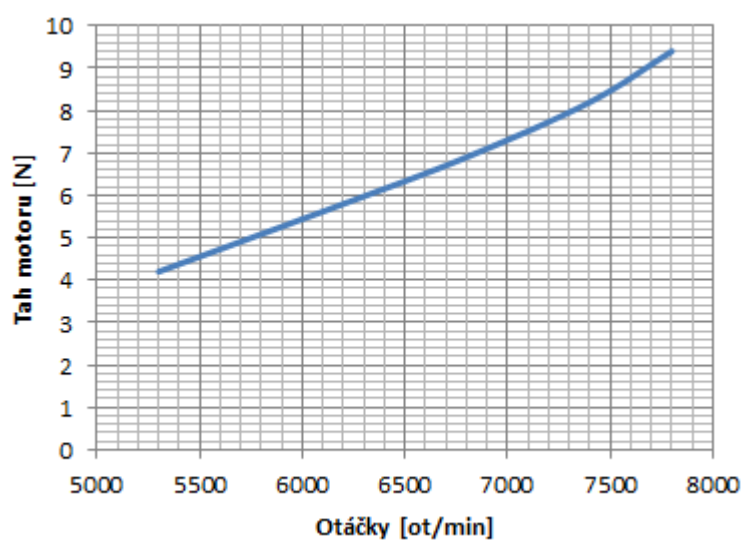
5.1.2 Režimy letu

Parametry režimů letu			
Režim letu	Tah [N]	Proud [A]	Otáčky [ot/min]
Stoupání	6,9	8,9	6800
Klesání	4,2	4,3	5300
Visení	4,9	5,4	5700
Vodorovný let	5,5	6,3	6000

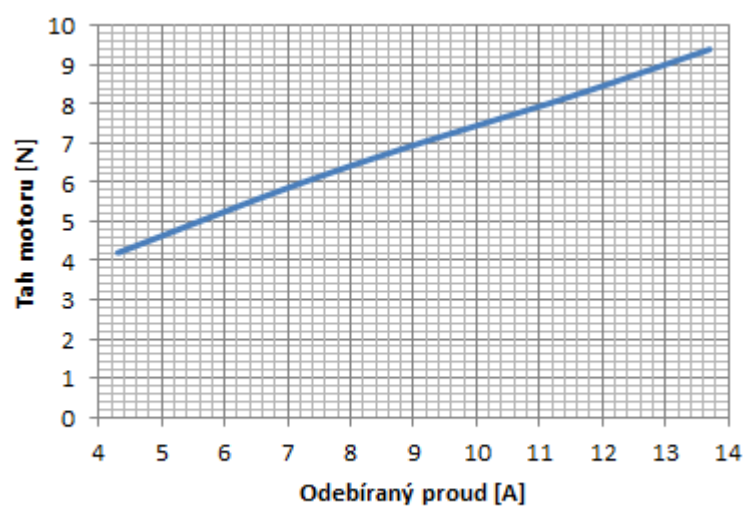
tab. 5.1 Parametry režimů letu

Stoupání: 2 m/s, zrychlení: 4 m/s²

Klesání: 1 m/s, zrychlení: 2 m/s²



obr. 5.5 Závislost tahu na otáčkách



obr. 5.6 Závislost tahu na proudu

5.1.3 Průměrná spotřeba proudu motorů

Režimy letu stoupání a klesání stačí pouze zprůměrovat, neboť o co více energie se spotřebuje při stoupání, o to méně se jí spotřebuje při klesání. Ztráty jsou již zahrnuty ve ztrátách motoru. Režimy vodorovný let a visení jsou v poměru 2:1.

$$I_{cm} = 4 \cdot \left(\frac{I_{stoupání} + I_{klesání} + 2 \cdot I_{vod.let} + I_{visení}}{5} \right) = \left(\frac{8,9 + 4,3 + 2 \cdot 6,3 + 5,4}{5} \right) = 25 \text{ A} \quad (6)$$

5.2 Kamera, přenos obrazu a ovládání

5.2.1 Kamera

Pro záznam obrazu byla vybrána známá a oblíbená digitální kamera GoPro s možností záznamu obrazu na vlastní paměť a také s digitálním výstupem obrazu ve Full HD. [23]

Rozměry kamerky jsou cca 60 x 42 x 14 mm. Váží pouhých 75 g. Napájení vlastním integrovaným akumulátorem, s výdrží 50 minut nepřetržitého nahrávání.



obr. 5.7 GoPro HD HERO 3 [23]

5.2.2 Přenos obrazu

Pro přenos obrazu k operátorovi byla vybrána souprava pro přenos obrazu v aktuálním čase, ve vysoké kvalitě a na velké vzdálenosti DJI Lightbridge. Je to Digitální Full HD 2,4 GHz video přenosová jednotka s dosahem 1,7 km a rozlišením 1920 x 1080p/30fps. Napájení pomocí vestavěného akumulátoru s dobou provozu až 4,5 hodiny. Zpoždění obrazu je maximálně 150 ms. Připojit se dá buď na mobilní telefon, tablet nebo monitor, televizi, videobrýle s HDMI vstupem. Rozměry letadlového modulu jsou 68mm x 48mm x 21mm a hmotnost je 71g. [21]



obr. 5.8 Přenos obrazu [21]

5.2.3 Ovládání

Pro ovládání stroje byla zvolena ovládací souprava DS-16 od firmy JETI model. Palcová varianta špičkového RC vysílače. Vysílače byly vyvinuty se zadáním na maximální užité vlastnosti, s důrazem na jednoduchou obsluhu, maximální životnost a spolehlivost mechanických částí. Vestavěná baterie vydrží 11 hodin provozu. Hmotnost vysílače činí 1,3 kg. [25]



obr. 5.9 DS-16 [25]

Při kombinaci se systémem Duplex 2,4 EX je možno přenášet data naměřených hodnot ze senzorů na displej vysílače. Je vybaven dvěma anténami délky 400 mm. Napájecí napětí je 3,2 až 8,4 V. Průměrný proud 40 mA. Rozměry jsou 62 x 38 x 16 a hmotnost 30 g. [26]

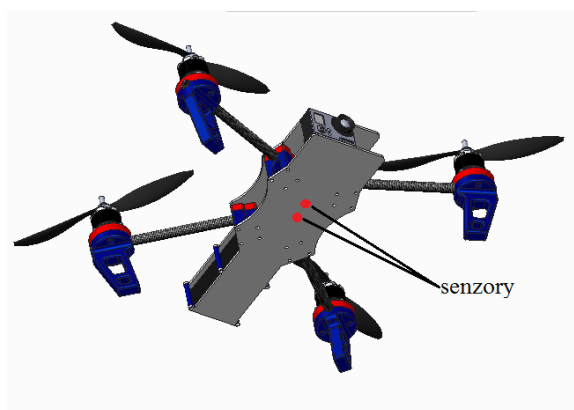


obr. 5.10 Duplex R18 EX [26]

5.3 Senzorické vybavení

Pro umožnění plnění zadaných úkolů bylo potřeba navrhnout vybavení vhodnými senzory pro měření daných veličin v ovzduší. U senzorů pro plnění daného úkolu je potřeba co nejrychlejší odezva neboli přechodová charakteristika.

Jako nejvhodnější umístění senzoru, jsem po konzultaci s odborníky na multikoptéry z katedry ATŘ, zvolil spodní část multikoptéry, uprostřed konstrukce.



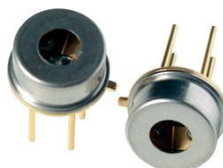
obr. 5.11 Umístění senzorů

Senzor oxidu uhelnatého AS-MLC

Nový senzor oxidu uhelnatého AS-MLC je velmi citlivý senzor se vyznačuje malou konstrukční velikostí a nízkým ztrátovým výkonem. Doba odezvy neboli čas potřebný k měření je udáván v sekundách, což vyhovuje daným požadavkům. [27]

Technické parametry	
Rozměr, Ø	10 mm
Rozměr, výška	11 mm
Provedení	Oxid uhelnatý
Žhavicí napětí	2,3 V
Splňuje RoHS	Ano

tab. 5.2 Technické informace AS-MLC [27]



obr. 5.12 Senzor oxidu uhelnatého AS-MLC [27]

Plynové čidlo kvality ovzduší Figaro TGS 2600-B00, znečištění vzduchu

Jako doplňkový senzor byl vybrán TGS 2600, specifikovaný pro monitorování celkové kvality ovzduší, vysoce selektivně reaguje na různá znečištění, která se vyskytují např. v cigaretovém kouři. Snímací prvek MOS založený na technologii silných vrstev má ztrátový výkon pouhých cca 15 mW na snímací prvek a typ. 210 mW na žhavicí drát. Čas potřebný k měření při užití tohoto senzorů je přibližně 3 minuty. [10]

Technické parametry	
Rozměr, Ø	9.2 mm
Rozměr, výška	7.8 mm
Provedení	Různé plyny, znečištění vzduchu
Žhavicí napětí	5 V
Splňuje RoHS	Ano

tab. 5.3 Technické informace TGS 2600-B00 [10]



obr. 5.13 Plynové čidlo kvality ovzduší [10]

5.4 Řídicí elektronika

5.4.1 Kompletní řídicí jednotka

Řízení multikoptéry je realizováno prostřednictvím řízení otáček jednotlivých motorů. K tomuto se používají speciální řídicí jednotky pro multikoptéry. Tudiž byla vybrána řídicí jednotka NAZA M Lite Multi-axis skládající se z řídicí jednotky mimo jiné vybavené autopilotem, stabilizací polohy, gyroskopy, barometrickým výškoměrem a GPS. Dále napájecí modul pro připojení k akumulátoru a anténa pro GPS. [19]



obr. 5.15 Kompletní řídicí jednotka [19]

Technické parametry	
Napájení (napájecí jednotka VU)	7,2-26,0 V (2-6S LiPo)
Napájení (řídicí jednotka MC)	4,8-5,5 V
Proudový odběr	max. 0,3 A při 5 V, normal 0,12 A při 5 V
Provozní teplota	-10°C až +50°C
Rozměry (napájecí jednotka VU)	32,2x21,1x7,7 mm
Rozměry (řídicí jednotka MC)	45,5x31,5x18,5 mm
Rozměry (GPS/kompas)	D46x9 mm
Hmotnost (napájecí jednotka VU)	20 g
Hmotnost (řídicí jednotka MC)	25 g
Hmotnost (GPS/kompas)	21,3 g
Podporované typy multikoptér	kvadrokoptéry I4, X4 hexakoptéry I6, X6, IY6, Y6
Výstupy pro regulátory	6x, opakovací frekvence 400 Hz
Výstupy pro užitečné zatížení	2x, opakovací frekvence nastavitelná 50/100/200/400 Hz
Letové výkony	
Vertikální přesnost visení (režim GPS stabilizace)	+/- 0,8 m
Horizontální přesnost visení (režim GPS stabilizace)	+/- 2,5 m
Max. úhlová rychlost bočení	200°/s
Max. úhel náklonu	45°
Max. rychlost stoupání / klesání	+/- 6 m/s

tab. 5.4 Technické informace řídicí jednotky NAZA M Lite [19]

5.4.2 Řízení otáček

Pro řízení otáček zvoleného střídavého elektromotoru byl zvolen regulátor Lynxmotion 30A Multirotor ESC 1A BEC. Jeho rozměry jsou 56 x 25 x 8 mm a hmotnost 27 g.



obr. 5.14 Řízení otáček [20]

5.4.3 Servomotor kamery

Pro ovládání naklopení kamery bylo zvoleno digitální mikroservo DS 101 SC. Servo má plastové převody, tah 0,25kg při 0.09sec/40st na 4,8V váha 2,25 g, rozměry 16,35 x 8,3 x 20,3 mm, provozní napětí: 4,5-5,5V. [28]



obr. 5.16 Mikroservo DS 101 SC [28]

5.4.4 Regulace napětí

Kvůli potřebnému napájení některých komponentů nižším napětím, než je výstupní napětí akumulátoru, je potřeba do obvodu zařadit regulátory napětí. Jedná se o regulaci napětí na 5 V pro systém Duplex R18 EX, mikroservo DS 101 SC a pro senzor TGS 2600. A dále regulaci na 2,3 V pro senzor AS-MLC.

Pololu 5V, 300mA Step-Down Voltage Regulator D24V3F5

Snižující měnič 5V/300mA

Vstupní napětí 3.8-42V

Výstupní napětí 5V

Výstupní proud až 300mA

Rozměry 13x10mm



obr. 5.17 Regulátor napětí 5V, 300mA [29]

Pololu Step-Down Voltage Regulator D24V3ALV

Snižující nastavitelný měnič 2.5-7.5V/300mA

Vstupní napětí 4.5-42V

Výstupní napětí 2.5 až 7.5V, nastavitelné

Výstupní proud až 300mA

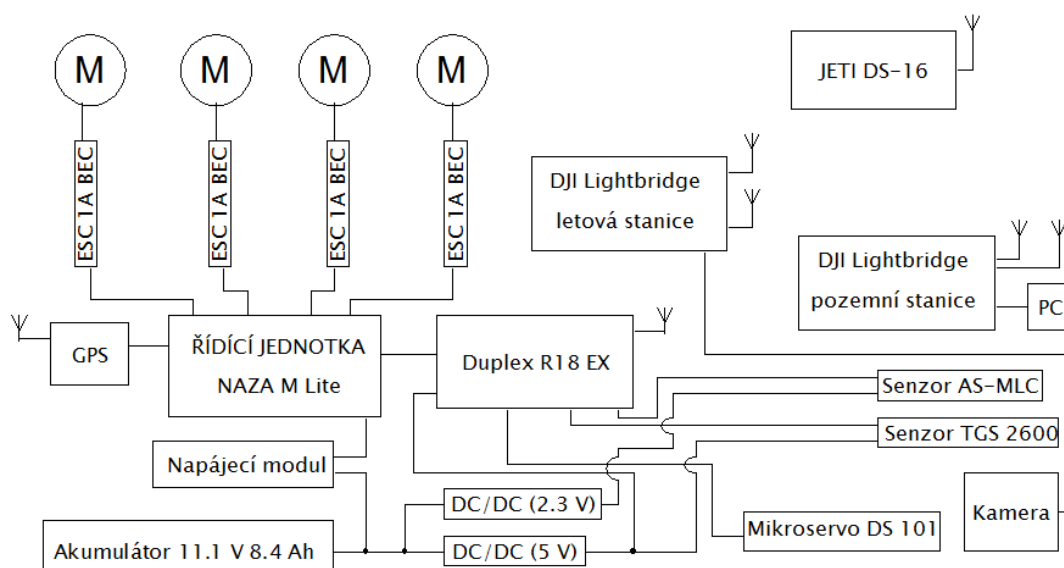
Rozměry 15x10mm



obr. 5.18 Regulátor napětí 2.5-7.5V/300mA [30]

5.5 Zapojení elektroniky

Na obr. 5.19 je zobrazeno stručné schéma zapojení elektroniky. Motory jsou řízeny prostřednictvím frekvenčních regulátorů otáček, které jsou dále připojeny k řídicí jednotce. Řídicí jednotka je napájena přes napájecí modul přímo z akumulátoru. Na řídicí jednotku je dále připojen GPS modul. Pověly do řídicí jednotky přicházejí z přijímače Duplex. Na tento přijímač, který funguje zároveň jako vysílač, je napojena většina elektroniky, kterou je potřeba ovládat, nebo kontrolovat. Jen kamera je napojena k letové stanici systému DJI Lightbridge, která zajišťuje přenos obrazu. Senzory a přijímač Duplex vyžadují napájení nižším napětím, než je napětí akumulátoru, tudíž jsou před tyto komponenty zařazeny regulátory napětí.



obr. 5.19 Schéma zapojení elektroniky

5.6 Návrh napájení

Pro napájení pohonů je potřeba zvolit akumulátor s napětím 11.1 V. Akumulátor musí být schopen dodávat energii pohonům a veškeré další elektronice po dobu alespoň 30 minut. Při volbě kapacity akumulátoru je potřeba brát v úvahu skutečnost, že pohony a další elektronika nebudou odebírat maximální proud stále. Pro výpočet byla proudová vytiženost pohonů navržena na 60 %.

Komponent	Počet kusů	Napětí [V]	Spotřeba proudu [A]
Motory	4	11,1	6,25
Řídící jednotka	1	5	0,12
Duplex R18 EX	1	5	0,04
Senzor AS-MLC	1	2.3	0,016
Senzor TGS 2600	1	5	0,045
Celková spotřeba			25,221
Minimální kapacita akumulátoru			cca 8,4 Ah

Tab. 5.4 Volba kapacity akumulátoru

5.6.1 Volba akumulátoru

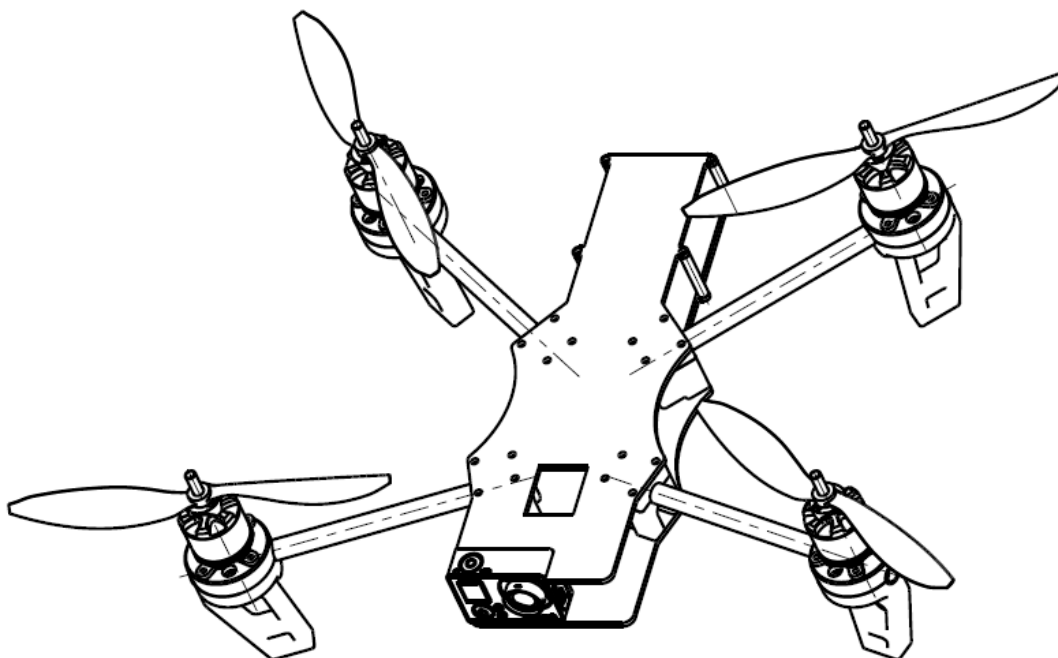
Vzhledem k nízké hmotnosti, malým rozměrům a vysoké kapacitě byl zvolen akumulátor Li-Pol Black Magic 11.1V 8400mAh 30C o rozměrech 44.7x 44.7 x 157 mm a hmotnosti 625 g. S tímto akumulátorem by multikoptéra měla vydržet v provozu přibližně 40 minut. [18]



obr. 5.20 Akumulátor Black Magic [18]

6 Konstrukce

Multikoptéra je tvořena částmi převážně z plastu. Tělo multikoptéry je tvořeno dvěma základními deskami, které mezi sebou svírají úchyty ramen a jsou do nich namontovány komponenty elektroniky. Základní desky jsou vyrobeny z plastu za pomoci 3D tisku. Tyč ramene je vyrobena z uhlíkového kompozitu kruhového průřezu. Na konci ramene je umístěna podpůrná noha a motorové lože s motorem. Tělo multikoptéry má podélně protáhlý tvar, což je vhodné pro vyvažování při rozmisťování komponentů. Většinu komponentů je vhodné připevňovat k tělu pomocí lepení.



obr. 6.1 Konstrukce multikoptéry

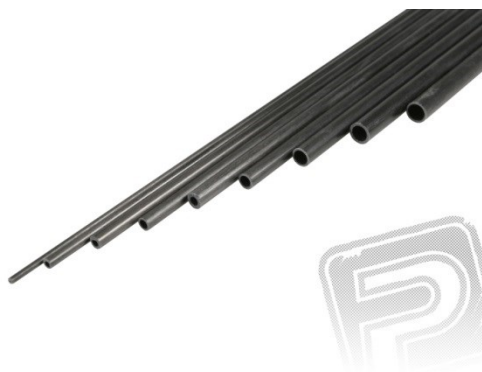
6.1 Návrh ramene

Tyč ramene je vyrobena z profilu mezikruhového tvaru. Použitým materiálem může být plast, hliník, uhlíkový kompozit nebo jiný. Rameno je namáháno především ohybem.

Mechanické vlastnosti						
	sklolaminát	uhlíkový laminát	ocel	hliník	ABS plast	ABS Conductive
Hustota (kg/m^3)	2 100	1650	7900	2700	1045	1050
Pevnost v ohybu (MPa)	1 000 – 1 400	1 400 – 2 500	400 – 1 200	180	72	162
Ohybový modul (GPa)	45 – 56	120 – 300	196	70	2,34	9,99
Pevnost v tahu (MPa)	1 000 – 1 400	1400	400 – 1 200	180	42	119
Modul pružnosti v tahu (GPa)	45	140	196	70	2,14	2,41

Tab. 6.1 Mechanické vlastnosti materiálů [31]

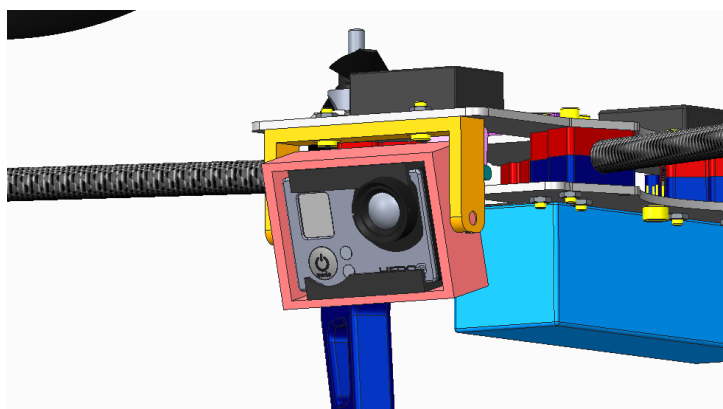
Z výpočtů uvedených v příloze A vyplývá, že nejvhodnějším materiálem pro tyč ramene je uhlíkový kompozit. Z toho důvodu byla pro výrobu ramene zvolena tyč z uhlíkového kompozitu mezikruhového průřezu. O rozměrech $d = 10 \text{ mm}$ a $D = 12 \text{ mm}$.



obr. 6.2 Uhlíkový nosník [24]

6.2 Uchycení kamery

Kamera je pro možnost nastavení aktuálně ideálního pohledu upevněna v naklápěcí montáži s tlumením vibrací viz. obrázek 6.3. Naklápění je ovládáno prostřednictvím servomotoru a je realizováno pouze v jedné ose, ostatní korekce musí být prováděny prostřednictvím pohybu celé multikoptéry. Tato naklápěcí montáž je také odrušena od zbytku konstrukce proti vibracím silentbloky z polyuretanové pěny.



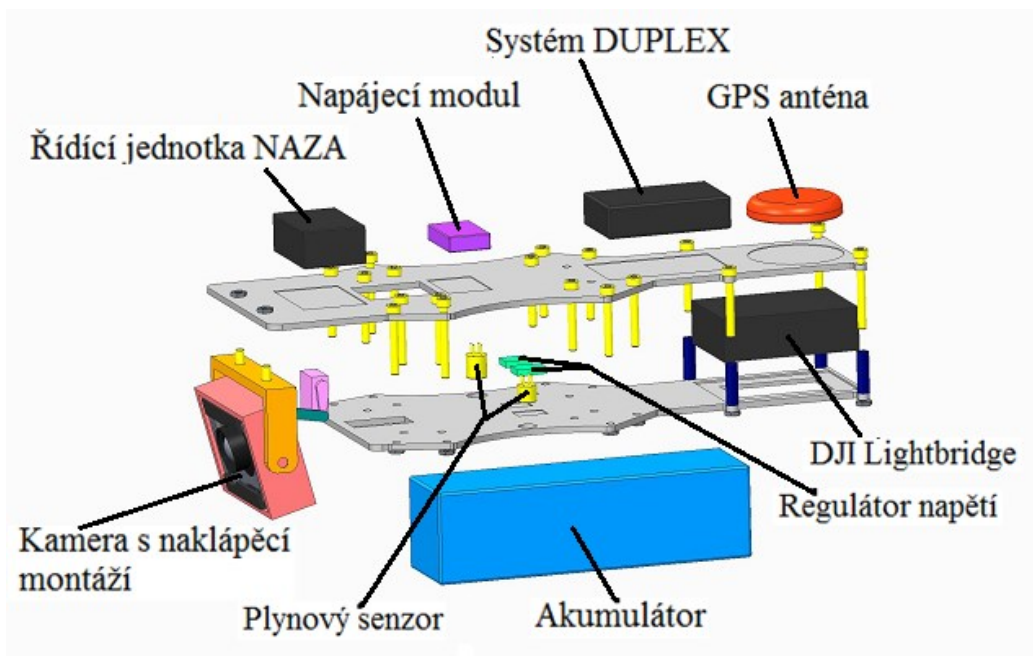
obr. 6.3 Naklápěcí montáž

6.3 Vyvážení a rozmístění komponentů

Pro zajištění dobré stability a rovnoměrné zatížení motorů bylo potřeba jednotlivé komponenty v konstrukci rozmístit tak, aby výsledné těžiště bylo soustředěno do bodu přesně mezi všemi čtyřmi motory. Bylo využito výhody sendvičové konstrukce a komponenty byly rozmístěny ve třech vrstvách jako je vidět na obrázcích 6.4 a 6.5. V horní vrstvě na horním plátu konstrukce jsou umístěny antény, systém DUPLEX a řídicí jednotka s napájecím modulem. Ve střední vrstvě je většina elektroniky. A ve spodní vrstvě je na dolní plát konstrukce připevněn akumulátor a dvojice senzorů. Akumulátor je nejtěžší část stroje, a proto je využit jako případné vyvážení. Akumulátor má možnost korigování polohy během montáže směrem vpřed nebo vzad a tím přesně vyvážit multikoptéru.



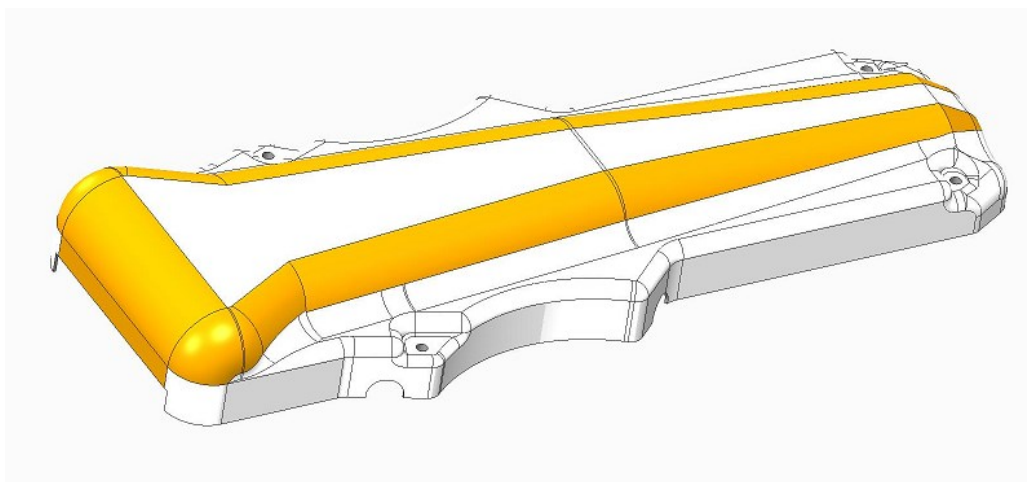
obr. 6.4 Multikoptéra osázena komponenty



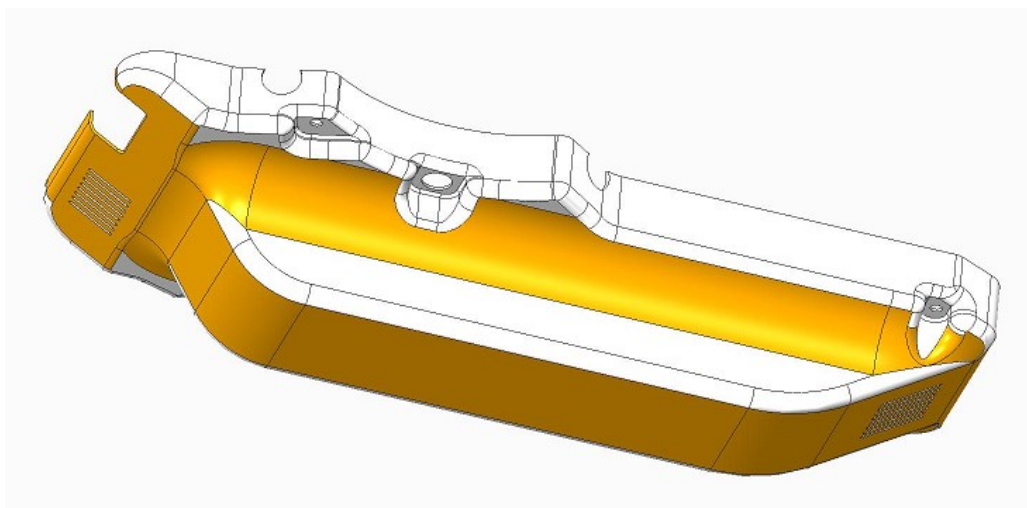
obr. 6.5 Rozmístění komponentů v těle multikoptéry

6.4 Krytování

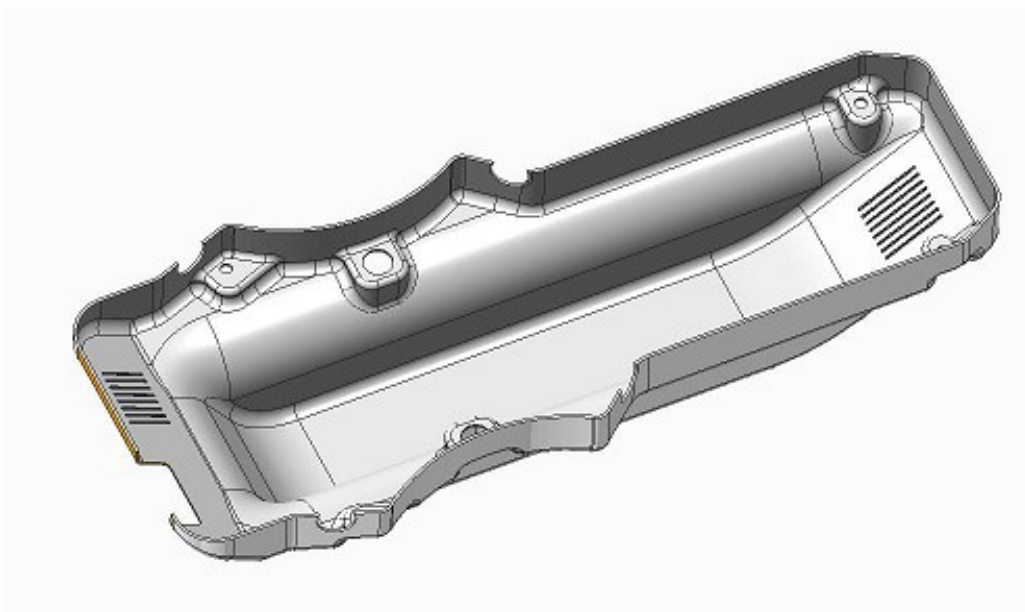
Pro možnost použití ve venkovním prostředí je potřeba zajistit ochranu elektroniky před nepříznivými vlivy počasí. Krytování je zajištěno plastovým skeletem, který je možno snadno sejmout a opět nasadit. Celé krytování se skládá ze dvou částí. Horní a spodní díl krytu těla. Oba díly jsou ke konstrukci připevněny čtyřmi šrouby. Montáž krytování je velmi snadná a rychlá. Krytování bylo dále opatřeno reflexním zbarvením pro dobrou viditelnost v prostoru. A pro lepší cirkulaci vzduchu uvnitř multikoptéry byl spodní kryt opatřen větracími mřížkami.



obr. 6.6 Horní díl krytu



obr. 6.7 Spodní díl krytu



obr. 6.8 Vnitřek spodního dílu krytu



obr. 6.9 Multikoptéra vybavena krytováním

7 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo provést konstrukční návrh bezpilotního monitorovacího létajícího zařízení, které by bylo schopné identifikovat lokální znečišťovatele ovzduší v malých obcích. Na začátku práce byla provedena rešerše možných použitelných létajících zařízení, senzorů potřebných k plnění daného úkolu, kamer a přenosu obrazu a také zjištění emisních limitů, které předepisuje daná vyhláška pro rodinné domy.

Vzhledem k zadání práce a možnostem zjištěných v rešerši byl vypracován požadavkový list, na jehož základě byly navrženy tři varianty. První varianta představovala klasický letoun, který měl zásadní nevýhodu v tom, že nemůže zastavit ve vzduchu, což znemožňovalo provedení potřebného měření. Druhá varianta byla helikoptéra, která byla nevýhodná kvůli vysoké náročnosti konstrukce. Třetí vítěznou variantou se stala multikoptéra, která se díky své jednoduchosti a kompaktnosti hodí k plnění zadaného úkolu. Tato varianta byla dále rozpracována a byl vypracován konstrukční návrh celého zařízení včetně vybavení.

Při návrhu bylo potřeba začít dimenzováním pohonů, které byly navrhovány pro odhadovanou předpokládanou hmotnost splňující požadavky dané požadavkovým listem. Následovala volba vhodné kamery a systému pro přenos obrazu, pro tento úkol byl zvolen přenosový systém od firmy DJI. Dále pro ovládání a přenos údajů o koncentraci nebezpečných plynů ze senzorů byla zvolena ovládací souprava JETI se systémem DUPLEX. Pro umožnění měření emisí byla navržena dvojice plynových senzorů. Jako vhodná řídicí jednotka byla zvolena souprava od firmy DJI obsahující samotnou řídicí jednotku vybavenou autopilotem, stabilizací polohy, gyroskopy, barometrickým výškoměrem, napájecím modulem a GPS. Akumulátor byl navržen na základě výpočtů spotřeby energie motorů při různých režimech letu a spotřeby ostatních elektronických komponentů. Ne všechna elektronika mohla být napájena přímým napětím akumulátoru, tudíž byly před dané komponenty zařazeny regulátory napětí.

Pro možnost nastavení aktuálně ideálního pohledu kamery je kamera upevněna v naklápěcí montáži. Naklápění je ovládáno prostřednictvím servomotoru a je realizováno pouze v jedné ose, ostatní korekce musí být prováděny prostřednictvím pohybu celé multikoptéry. Díky jednoduchosti ovládání kamery stačí pro kompletní ovládání multikoptéry jen jeden operátor. Kamera je od montáže odrušena proti vibracím speciální vložkou z polyuretanové pěny.

Nakonec bylo řešeno vhodné krytování, které by ochránilo elektroniku proti vnějším vlivům. Krytování bylo vyřešeno jako plastová skořepina vyrobená 3D tiskem, připevněna ke konstrukci čtyřmi šrouby. Dále bylo krytování opatřeno větracími mřížkami pro zlepšení cirkulace vzduchu uvnitř multikoptéry a tím zamezení přehřívání elektroniky. Krytování bylo také opatřeno reflexním zbarvením pro dobrou viditelnost v prostoru.

Celková hmotnost létajícího zařízení je přibližně 1,8 kg, což naprosto splňuje dané požadavky. Hmotnost elektronických komponentů je 1,3 kg, přibližná hmotnost konstrukce je 0,5 kg. Maximální vzletová hmotnost je okolo 2,5 kg, tudíž je možno multikoptéru navíc zatížit přibližně 0,7 kg. Toho může být využito například k montáži výkonnějšího fotoaparátu, kamery nebo lepší elektroniky.

Během dokončování práce jsem navštívil Olomouckou firmu SKYVID zabývající se leteckým snímkováním za použití multikoptér. Shodli jsme se na tom, že největší problém by mohl být v kombinaci elektroniky a že by pro ověření funkčnosti musela být celá sestava složena a ověřeno, zda spolu jednotlivé komponenty komunikují. Dalším problémem by mohly být motory, ne každý totiž snáší vlhkost, ale zároveň musí být dobře chlazeny, takže je nelze zakrytovat.

Tato bakalářská práce byla zaměřena především na konstrukci létajícího zařízení a na vybavení všemi komponenty potřebnými pro plnění úkolu a pro snadnou komunikaci s operátorem. Na základě požadavkového listu bylo zařízení vybaveno všemi důležitými komponenty a byla vyřešena vhodná a jednoduchá konstrukce a krytování.

Použité zdroje

- [1] LEINVEBER, Jan; VÁVRA, Pavel. Strojnické tabulky. Úvaly: Albra, 2005. 921 s. ISBN 80-86490-74-2.
- [2] ŠVERCL, J.: Techické kreslení a deskriptivní geometrie. Scientia, Praha, 2003, 340 s. ISBN 80-7183-297-9.
- [3] KALÁB, Květoslav. Části a mechanismy strojů pro bakaláře: Části spojovací. Ostrava: VŠB– TU Ostrava, 2007. 95 s. ISBN 978-80-248-1290-8.
- [4] Zákony pro lidi [online]. [cit.2014-10-08] Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201>
- [5] Oxid uhelnatý [online]. [cit.2014-10-08] Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_uhelnat%C3%BD
- [6] TOC [online]. [cit.2014-11-26] Dostupné z: <http://www.tretiruka.cz/news/co-znamena-parametr-toc-jak-se-stanovuje-a-jakou-ma-navaznost-na-parametr-chsk-/>
- [7] Tuhé znečišťující látky [online]. [cit.2014-12-03] Dostupné z: <http://www.cistenebe.cz/slovnicek-pojmu/146-tuhe-zneucistujici-latky-tzl>
- [8] Detektor plynů [online]. [cit.2014-12-03] Dostupné z: <http://robotstore.cz/obchod/arduino/mq-7-detekce-plynu-co-oxid-uhelnaty-arduino-modul/>
- [9] Plynový senzor [online]. [cit.2014-12-03] Dostupné z: <http://www.conrad.cz/plynovy-senzor-typ-822-figaro-tgs-822-co-amoniak-oxid-siricity-etanol-benzin.k183466>
- [10] Plynové čidlo kvality vzduchu [online]. [cit.2014-12-03] Dostupné z: <http://www.conrad.cz/plynove-cidlo-kvality-ovzdusi-figaro-tgs-2600-b00-znecisteni-vzduchu.k183304>
- [11] Letadlo kadet seniorita [online]. [cit.2014-12-11] Dostupné z: <http://www.peckamodel.cz/produkt/rc-modely-a-prislusenstvi/rc-letadla/letadla-pro-spalovaci-motor/rozpeti-1401-2000-mm/3dk1516-kadet-seniorita>

- [12] Vrtulník innova 550 [online]. [cit.2014-12-11] Dostupné z:
<http://www.rcking.eu/cs/rc-vrtulniky-klasicke/68898-innova-550-fbl-kit.html>
- [13] Víceroťorový vrtulník naza m-lite [online]. [cit.2014-12-11] Dostupné z:
<http://www.rcking.eu/cs/rc-vrtulniky-vicerotorove/67926-f450-naza-m-lite-gps-podvozek.html>
- [14] Letadlo tiger trainer [online]. [cit.2014-12-11] Dostupné z:
<http://www.peckamodel.cz/produkt/rc-modely-a-prislusenstvi/rc-letadla/letadla-pro-spalovaci-motor/rozpeti-1401-2000-mm/4582-r-tiger-trainer-60-arf-cerveny>
- [15] Hexakoptéra f-550 [online]. [cit.2014-12-15] Dostupné z:
<http://www.rcking.eu/cs/rc-vrtulniky-vicerotorove/41283-dji-f550-arf-kit-hexakoptera.html>
- [16] Plynové čidlo oxidu uhelnatého [online]. [cit.2014-12-15] Dostupné z:
<http://www.conrad.cz/plynove-cidlo-oxidu-uhelnatehofigaro-tgs-2442-b00-oxid-uhelnaty.k183303>
- [17] Motor UAV [online]. [cit.2015-03-11] Dostupné z:
<http://www.robotshop.com/en/tmotor-uav-brushless-motor-mt2212-1100kv.html>
- [18] Akumulátor [online]. [cit.2015-03-11] Dostupné z:
<http://www.modelarina.cz/lipol-car-black-magic-111v-8400mah-30c-traxxas-p-10629.html>
- [19] Řídící jednotka [online]. [cit.2015-03-11] Dostupné z:
<http://www.modelarina.cz/ridici-jednotka-naza-lite-multiaxis-platforma-gps-combo-p-11451.html>
- [20] Řízení otáček [online]. [cit.2015-03-11] Dostupné z:
<http://www.robotshop.com/en/lynxmotion-30a-multirotor-esc-1a-bec-with-connectors.html>
- [21] Přenos obrazu [online]. [cit.2015-03-11] Dostupné z:
<http://www.modelarina.cz/lightbridge-24-full-hd-digital-video-downlink-p-42055.html>

- [22] CMOS Camera [online]. [cit.2015-04-11] Dostupné z:
<http://www.robotshop.com/en/cmos-camera-fpv-720x480-pixels.html>
- [23] GoPro 3 camera [online]. [cit.2015-04-11] Dostupné z: <http://gopro3.cz/>
- [24] Uhlíkový nosník [online]. [cit.2015-04-11] Dostupné z: <http://www.model-rc.cz/stavebni-materialy/uhlik-a-laminat////uhlikova-trubicka-10x8mm-1m-6bi21928/>
- [25] Ovládací souprava [online]. [cit.2015-04-11] Dostupné z:
<http://www.jetimodel.com/cs/katalog/Vysilace/@produkt/DS-16/>
- [26] Systém Duplex EX [online]. [cit.2015-04-11] Dostupné z:
<http://www.jetimodel.com/cs/katalog/Duplex-2-4-EX/@produkt/Duplex-R18-EX/>
- [27] Senzor oxidu uhelnatého AS-MLC [online]. [cit.2015-04-27] Dostupné z:
<http://www.conrad.cz/senzor-oxidu-uhelnateho-as-mlc.k502242>
- [28] Mikroservo DS 101 SC MLC [online]. [cit.2015-04-27] Dostupné z:
<http://www.modelarina.cz/digitalni-mikroservo-ds-101-sc-tloustka-83mm-p-38724.html>
- [29] Regulátor napětí 5V, 300mA [online]. [cit.2015-04-29] Dostupné z:
<https://www.pololu.com/product/2098>
- [30] Regulátor napětí , 2.5-7.5V/300mA [online]. [cit.2015-04-29] Dostupné z:
<https://www.pololu.com/product/2101>
- [31] Mechanické vlastnosti materiálů [online]. [cit.2015-04-29] Dostupné z:
<http://www.5m.cz/cz/kompozitni-profil/>
- [32] E-konstruktor [online]. [cit.2015-04-29] Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/technicke-vypocty>

Přílohy

Výkresová dokumentace

Sestavný výkres multikoptéry	BC-PAL0119-01
Podsestava ramene	BC-PAL0119-01-01
Podsestava těla	BC-PAL0119-01-02
Výrobní výkres horního plátu těla	BC-PAL0119-01-03
Blokové schéma zapojení elektroniky	BC-PAL0119-01-04

Textová dokumentace

- Datový list senzoru FIGARO TGS2600 B00
- Datový list senzoru AS MLC
- Katalog vysílače DS-16
- Katalog systému Duplex-EX

Příloha A – výpočty průhybu nosníku pomocí aplikace e-konstrukér

Přiložené CD

- Bakalářská práce.docx
- Bakalářská práce.pdf
- Výkresová dokumentace
- 3D modely v CREO 2.0
- Katalogy a datové listy k vybraným komponentům

Příloha A – výpočty průhybu nosníku pomocí aplikace e-konstruktér

[32]

KVADRATICKÝ MOMENT PRŮŘEZU, MODUL PRŮŘEZU V OHYBU MEZIKRUŽÍ

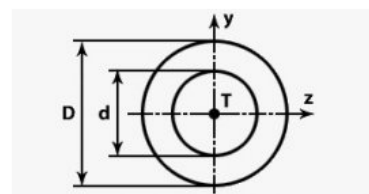
Vstupní parametry

D vnější průměr	<input type="text" value="10"/>	mm	d vnitřní průměr	<input type="text" value="8"/>	mm
-----------------	---------------------------------	----	------------------	--------------------------------	----

VYPOČÍTAT

Výstupní hodnoty

I _y kvadratický moment k ose y	<input type="text" value="289.811922294"/>	mm ⁴	I _z kvadratický moment k ose z	<input type="text" value="289.811922294"/>	mm ⁴
W _{oz} =W _{oy} modul průřezu v ohybu					
	<input type="text" value="57.962384459"/>	mm ³			



Průhyb nosníku ze sklolaminátu

VÝPOČET PRŮHYBU STATICKY URČITÉHO NOSNÍKU

Výpočet průhybu staticky určitého nosníku vetknutého zatíženého osamělou silou

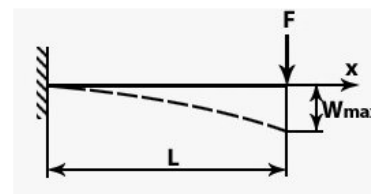
Vstupní parametry

F síla	<input type="text" value="0.01"/>	kN	L délka nosníku	<input type="text" value="200"/>	mm
E modul pružnosti v tahu	<input type="text" value="45"/>	GPa	I kvadr. mom. průřezu	<input type="text" value="289.811922294"/>	mm ⁴

VYPOČÍTAT

Výstupní hodnoty

W max (max. průhyb)	<input type="text" value="2.045"/>	mm	x (bod max. průhybu)	<input type="text" value="200"/>	mm
---------------------	------------------------------------	----	----------------------	----------------------------------	----



Průhyb nosníku z uhlíkového laminátu

VÝPOČET PRŮHYBU STATICKY URČITÉHO NOSNÍKU

Výpočet průhybu staticky určitého nosníku vetknutého zatíženého osamělou silou

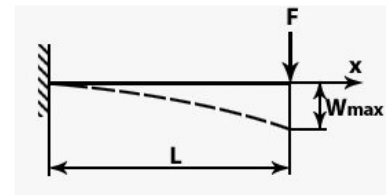
Vstupní parametry

F síla	<input type="text" value="0.01"/>	kN	L délka nosníku	<input type="text" value="200"/>	mm
E modul pružnosti v tahu	<input type="text" value="140"/>	GPa	I kvadr. mom. průřezu	<input type="text" value="289.811922294"/>	mm ⁴

VYPOČÍTAT

Výstupní hodnoty

W max (max. průhyb)	<input type="text" value="0.657"/>	mm	x (bod max. průhybu)	<input type="text" value="200"/>	mm
---------------------	------------------------------------	----	----------------------	----------------------------------	----



Průhyb nosníku z oceli

VÝPOČET PRŮHYBU STATICKY URČITÉHO NOSNÍKU

Výpočet průhybu staticky určitého nosníku vetknutého zatíženého osamělou silou

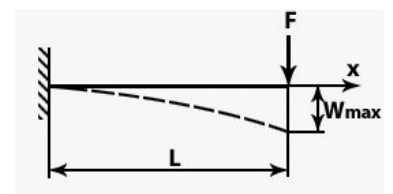
Vstupní parametry

F síla	<input type="text" value="0.01"/>	kN	L délka nosníku	<input type="text" value="200"/>	mm
E modul pružnosti v tahu	<input type="text" value="196"/>	GPa	I kvadr. mom. průřezu	<input type="text" value="289.811922294"/>	mm ⁴

VYPOČÍTAT

Výstupní hodnoty

W max (max. průhyb)	<input type="text" value="0.469"/>	mm	x (bod max. průhybu)	<input type="text" value="200"/>	mm
---------------------	------------------------------------	----	----------------------	----------------------------------	----



Průhyb nosníku z hliníku

VÝPOČET PRŮHYBU STATICKY URČITÉHO NOSNÍKU

Výpočet průhybu staticky určitého nosníku vetknutého zatíženého osamělou silou

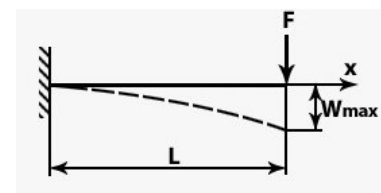
Vstupní parametry

F síla	<input type="text" value="0.01"/>	kN	L délka nosníku	<input type="text" value="200"/>	mm
E modul pružnosti v tahu	<input type="text" value="70"/>	GPa	I kvadr. mom. průřezu	<input type="text" value="289.811922294"/>	mm ⁴

VYPOČÍTAT

Výstupní hodnoty

W max (max. průhyb)	x (bod max. průhybu)
<input type="text" value="1.314"/> mm	<input type="text" value="200"/> mm



Průhyb nosníku z ABS plastu

VÝPOČET PRŮHYBU STATICKY URČITÉHO NOSNÍKU

Výpočet průhybu staticky určitého nosníku vetknutého zatíženého osamělou silou

Vstupní parametry

F síla	<input type="text" value="0.01"/>	kN	L délka nosníku	<input type="text" value="200"/>	mm
E modul pružnosti v tahu	<input type="text" value="2.14"/>	GPa	I kvadr. mom. průřezu	<input type="text" value="289.811922294"/>	mm ⁴

VYPOČÍTAT

Výstupní hodnoty

W max (max. průhyb)	x (bod max. průhybu)
<input type="text" value="42.997"/> mm	<input type="text" value="200"/> mm

